



**BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ  
CỤC THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ QUỐC GIA**

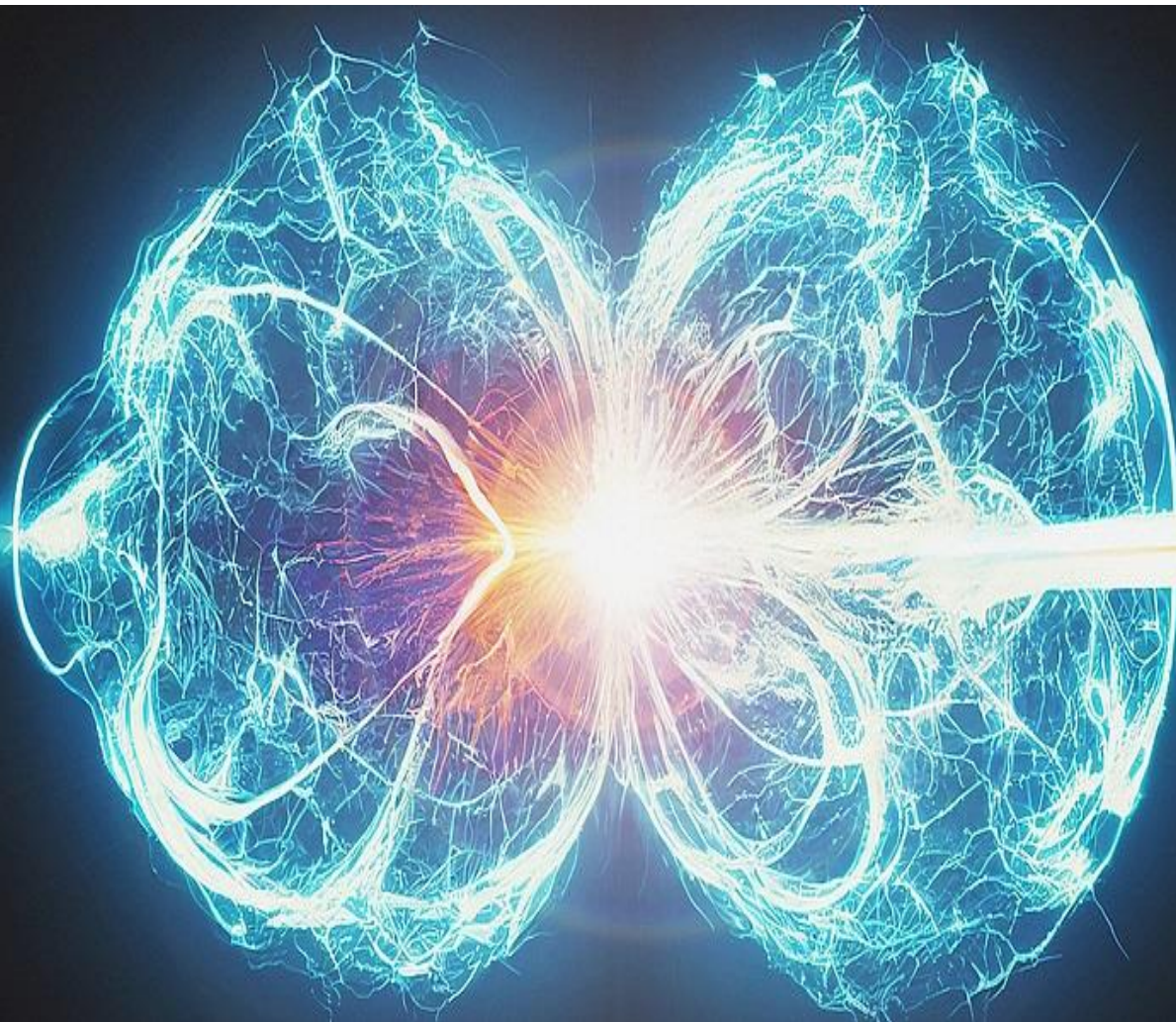
**TỔNG  
LUẬN**

**KHOA HỌC  
CÔNG NGHỆ  
KINH TẾ**

ISSN 0866 - 7712

Số 10 - 2023

**NĂNG LƯỢNG HẠT NHÂN HƯỚNG TỚI MỤC TIÊU  
THẾ GIỚI KHÔNG PHÁT THẢI**



Hà Nội, tháng 10-2023

# CỤC THÔNG TIN VÀ KHOA HỌC CÔNG NGHỆ QUỐC GIA

Địa chỉ: 24, Lý Thường Kiệt, Hoàn Kiếm, Hà Nội.

Tel: (024) 38262718, Fax: (024) 39349127

## BAN BIÊN TẬP

TS. Trần Đắc Hiến (Trưởng ban); ThS. Trần Thị Thu Hà (Phó Trưởng ban)

ThS. Nguyễn Lê Hằng; ThS. Phùng Anh Tiến

---

### MỤC LỤC

GIỚI THIỆU.....	1
I. HIỆN TRẠNG ĐIỆN HẠT NHÂN TRÊN THẾ GIỚI HIỆN NAY.....	2
1.1. Hạt nhân vẫn là nguồn điện sạch hàng đầu.....	2
1.2. So sánh năng lượng hạt nhân với năng lượng tái tạo.....	7
1.3. Năng lực cạnh tranh của năng lượng hạt nhân.....	10
II. NĂNG LƯỢNG HẠT NHÂN TRONG LỘ TRÌNH HƯỚNG TỚI PHÁT THẢI “NET ZERO” .....	17
2.1. Đóng góp của điện hạt nhân hướng tới phát thải net zero .....	17
2.2. Vai trò của điện hạt nhân trong lộ trình chuyển đổi năng lượng .....	20
III. Lò phản ứng mô đun nhỏ (SMR).....	23
3.1. Các đặc điểm thiết kế chính .....	25
3.2. Một số thuộc tính công nghệ và tài chính làm tăng tính khả thi của SMR trong tương lai.....	27
3.3. Hiện trạng nghiên cứu, phát triển và triển khai .....	28
3.4. SMR hướng tới một số nhiệm vụ khó khăn nhất của chuyển đổi năng lượng .....	33
IV. MỘT SỐ NÉT VỀ PHÁT TRIỂN NĂNG LƯỢNG Ở VIỆT NAM VÀ KHUYẾN NGHỊ.....	35
TÀI LIỆU THAM KHẢO .....	40

## GIỚI THIỆU

Biến đổi khí hậu đặt ra cho chúng ta thách thức lớn: giảm phát thải ròng khí nhà kính xuống mức 0% nhanh hơn hoặc phải đổi mặt với những hậu quả ngày càng thảm khốc từ một hành tinh đang nóng lên không ngừng. Trước tình thế cấp bách đó, ngày càng có nhiều quốc gia cam kết đưa phát thải ròng về 0 trong vòng vài thập kỷ tới bằng cách hạn chế sử dụng nhiên liệu hóa thạch, thay thế bằng các nguồn năng lượng tái tạo....

Theo thống kê năm 2016, ngành năng lượng chiếm khoảng 73,2% lượng phát thải khí nhà kính toàn cầu<sup>1</sup>. Do vậy, giảm thiểu các nguồn năng lượng phát thải carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) chính là chìa khóa để giải quyết thách thức nêu trên. Tuy nhiên, đảm bảo nhu cầu tiêu thụ điện để phát triển kinh tế và an sinh xã hội cũng là một bài toán hóc búa không kém đối với các nhà hoạch định xã hội. Trên toàn cầu, các nhà máy điện hạt nhân sản xuất hơn một phần tư tổng lượng điện carbon thấp. Trong 5 thập kỷ qua, điện hạt nhân đã giúp tránh được phát thải khoảng 70 gigaton<sup>2</sup> (Gt) CO<sub>2</sub> và tiếp tục tránh được hơn 1 Gt CO<sub>2</sub> mỗi năm. Ngoài ra, năng lượng hạt nhân là một nguồn điện linh hoạt, dễ điều khiển. Hiện nay, khi mà việc sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo đang tăng lên, điện hạt nhân cũng sẽ đóng góp quan trọng vào an ninh cung cấp năng lượng và ổn định lưới điện. Đáng chú ý là ngày càng có nhiều nhà khoa học, nhà hoạch định chính sách và công chúng công nhận hạt nhân là một phần quan trọng của hệ thống năng lượng khử carbon. Ủy ban liên chính phủ về Biến đổi khí hậu (IPCC) và Cơ quan Năng lượng quốc tế đều đưa ra những thông điệp công nhận vai trò của năng lượng hạt nhân trong việc giải quyết khủng hoảng khí hậu. Ủy ban Kinh tế Liên hợp quốc khu vực châu Âu gọi năng lượng hạt nhân là “công cụ không thể thiếu” để đạt được các Mục tiêu Phát triển bền vững.

Dựa trên những tài liệu của các tổ chức có uy tín trên thế giới, Cục Thông tin khoa học và công nghệ quốc gia biên soạn tổng luận “Năng lượng hạt nhân - hướng tới một thế giới không phát thải” nhằm mang lại những góc nhìn mới, cũng như cập nhật những thông tin mới nhất về công nghệ sản xuất năng lượng hạt nhân. Chúng tôi hy vọng tài liệu sẽ giúp bạn đọc, các nhà nghiên cứu và hoạch định chính sách có thêm thông tin để nhìn nhận, đánh giá cởi mở hơn về nguồn năng lượng này.

Xin trân trọng giới thiệu.

CỤC THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ  
CÔNG NGHỆ QUỐC GIA

---

<sup>1</sup> Global greenhouse gas emission by sector. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#energy-electricity-heat-and-transport-73-2>

<sup>2</sup> 1 Gt = 1 tỷ tấn

# I. HIỆN TRẠNG ĐIỆN HẠT NHÂN TRÊN THẾ GIỚI HIỆN NAY

## 1.1. Hạt nhân vẫn là nguồn điện sạch hàng đầu

Năm 2020, điện hạt nhân chiếm khoảng 10% sản lượng điện toàn cầu. Mặc dù tỷ lệ này đã giảm từ mức 18% vào cuối những năm thập niên 1990, nhưng hạt nhân vẫn là nguồn điện phát thải thấp thứ hai (tức là không dựa trên nhiên liệu hóa thạch) sau thủy điện và là nguồn điện chủ đạo ở các nền kinh tế tiên tiến<sup>3</sup>. Cũng trong năm 2020, điện hạt nhân vẫn vượt tổng phần đóng góp của điện gió và điện mặt trời cộng lại trên toàn thế giới, mặc dù các nguồn năng lượng tái tạo này đều đạt được mức tăng trưởng vượt bậc. Cuối năm 2021, có 439 lò phản ứng điện hạt nhân đang hoạt động tại 32 quốc gia trên thế giới, với tổng công suất là 413 GW. Khoảng 270 GW công suất này là ở các nền kinh tế tiên tiến. Điện hạt nhân đã đóng góp lớn vào việc làm chậm mức gia tăng khí thải CO<sub>2</sub> toàn cầu từ những năm thập niên 1970. Từ năm 1971 đến 2020, thế giới đã tránh được khoảng 66 Gt CO<sub>2</sub> phát thải.

Nếu không có điện hạt nhân, tổng lượng phát thải từ sản xuất điện sẽ cao hơn gần 20% và tổng lượng phát thải liên quan đến năng lượng cũng sẽ cao hơn 6% trong khoảng thời gian đó. Các nền kinh tế tiên tiến chiếm hơn 85% lượng khí thải tránh được này: 20 Gt, hay hơn 40% tổng lượng khí thải từ sản xuất điện ở Liên minh châu Âu; và 24 Gt, hay 25%, ở Mỹ. Không có năng lượng hạt nhân, khí thải từ sản xuất điện sẽ cao hơn khoảng một phần tư ở Nhật Bản và cao hơn khoảng 50% ở Hàn Quốc và Canada.

### *Vị trí dẫn đầu thị trường đang chuyển dịch khỏi các nền kinh tế tiên tiến*

Gần 70% số lò phản ứng toàn cầu là ở các nền kinh tế tiên tiến, nhưng những lò này đang lão hóa. Giữa các khu vực có sự khác biệt lớn về tuổi thọ trung bình của các lò phản ứng hạt nhân, từ chỉ 5 năm ở Trung Quốc đến 15 năm ở Ấn Độ, 36 năm ở Bắc Mỹ và 38 năm ở châu Âu. Vị trí dẫn đầu thị trường đã chuyển sang Nga và Trung Quốc: 27 trong số 31 lò phản ứng bắt đầu xây dựng từ năm 2017 là của Nga hoặc thiết kế của Trung Quốc.

Đầu tư vào điện hạt nhân ở các nền kinh tế tiên tiến đã bị đình trệ trong hai thập niên qua vì các dự án mới có chi phí cao, thời gian xây dựng dài, thị trường điện và môi trường chính sách không thuận lợi và thiếu niềm tin sau sự cố tại Nhà máy điện hạt nhân Fukushima Daiichi. Xây dựng các lò phản ứng thế hệ III đầu tiên của loại này đã bị trì hoãn và đội vốn lên đáng kể. Khả năng cạnh tranh của các nhà máy điện hạt nhân mới kém đi nhiều bởi thực tế là hầu hết các thị trường điện vẫn không trả phí thỏa đáng cho lượng khí thải thấp và các thuộc tính có thể được điều khiển linh hoạt của năng lượng hạt nhân.

---

<sup>3</sup> Australia, Canada, Chile, the 27 members of the European Union, Iceland, Israel, Japan, Korea, Mexico, New Zealand, Norway, Switzerland, Turkey, the United Kingdom and the United States.

### **Hộp 1. Dự án Năng lượng hạt nhân + thông minh đầu tiên của Trung Quốc tại Vinh Thành**

Ngày 13/4/2021, ngành điện hạt nhân Trung Quốc khởi công xây dựng dự án năng lượng thông minh Guohe One+ tại Vinh Thành, thành phố Uy Hải. Dự án Guohe One+ nhằm mục đích chuyển đổi Uy Hải, nằm ở bờ biển phía Đông của Trung Quốc, thành một thành phố thí điểm trung hòa carbon tích hợp công nghệ hạt nhân và công nghệ năng lượng carbon thấp khác.

Là phần mở rộng của hai lò phản ứng nước điều áp hiện đại ở Vinh Thành, dự án Guohe One+ sẽ triển khai nền tảng dịch vụ và quản lý năng lượng thông minh để tích hợp điện hạt nhân, điện mặt trời, điện gió ngoài khơi và các công nghệ khác vào hệ thống điện sạch. Hệ thống thông minh và tích hợp carbon thấp này cũng sẽ tối ưu hóa việc cung cấp nhiệt, khử muối nước biển và sản xuất hydro bằng cách sử dụng năng lượng hạt nhân.

Khi Guohe One+ đi vào hoạt động, nguồn cung điện sạch sẽ được tăng trung bình 6 GWh mỗi năm, tiết kiệm 1889 tấn than tiêu chuẩn và giảm lượng khí thải CO<sub>2</sub> xuống 5167 tấn. Tổng đầu tư trong giai đoạn đầu là khoảng 30 triệu RMB (4,6 triệu USD) và tỷ suất sinh lời nội bộ dự kiến đạt trên 8%.

Guohe One+ được chính quyền địa phương đánh giá cao và đã ký thỏa thuận hợp tác với Tổng công ty Đầu tư điện lực nhà nước (SPIC), nhà phát triển Guohe One+ và là nhà sản xuất điện lớn ở Trung Quốc. Trong tương lai, chính quyền địa phương và SPIC dự định cùng phát triển thêm hai dự án thí điểm hệ thống năng lượng tích hợp, cùng với Guohe One+, sẽ cung cấp mô hình cho các dự án năng lượng thông minh trên toàn Trung Quốc.

*Nguồn: Tổng công ty Đầu tư điện lực nhà nước, Trung Quốc*

Trong những năm tới, các nhà máy điện hạt nhân dự kiến sẽ sớm bị buộc ngừng hoạt động, đặc biệt là ở các nền kinh tế tiên tiến, do giấy phép hoạt động của các nhà máy hiện tại sắp hết hạn, nên buộc phải giảm dần hoạt động theo chính sách hoặc ngừng hoạt động vì lý do kinh tế. Tuy nhiên, các đợt mở rộng vòng đời sẽ làm chậm tốc độ đóng cửa đến một mức độ nào đó. Ví dụ, Mỹ đã gia hạn thêm 20 năm hoạt động cho các giấy phép có thời hạn hoạt động ban đầu là 40 năm cho 88 trong số 93 lò phản ứng hiện đang hoạt động trên toàn quốc, trong khi 11 lò phản ứng đã nộp đơn xin gia hạn thêm 20 năm, nâng tuổi thọ của chúng lên 80 năm. Pháp đã triển khai một chương trình gia hạn thêm 10 năm cho các nhà máy đáp ứng được những yêu cầu an toàn, trong khi các nhà máy ở Hungary, Phần Lan, Cộng hòa Séc và Vương quốc Anh gần đây cũng được gia hạn thêm 20 năm. Tổng cộng, các đợt mở rộng này đã ngăn đóng cửa gần một phần tư tổng công suất mà lẽ ra sẽ buộc phải ngừng hoạt động vào năm 2020, tỷ phần này sẽ tăng lên gần 40% vào năm 2030.

#### *Đầu tư đã bắt đầu phục hồi, chủ yếu do Trung Quốc và Nga*

Gia tăng công suất điện hạt nhân đã giảm dần trong những năm 2000, nhưng hiện đang bắt đầu tăng trở lại, đặc biệt là ở Trung Quốc và Nga. Mức tăng công suất lên đến đỉnh điểm vào những năm thập niên 1980, khi 230 GW của các nhà máy điện hạt nhân mới được hòa vào lưới điện trên toàn cầu, chủ yếu ở châu Âu và Bắc Mỹ. Nhưng việc xây mới đã chậm lại rất mạnh trong những năm 1990 sau những vụ tai nạn hạt nhân nghiêm trọng tại Three Mile Island ở Mỹ vào năm 1979 và Chernobyl ở Ukraine thời Liên Xô vào năm 1986, nên chỉ có 25 GW công suất mới tăng thêm.

Công suất bổ sung tăng trở lại lên 46 GW trong những năm 2000 và 56 GW vào những năm 2010, bất chấp tác động của sự cố Fukushima Daiichi năm 2011 tại Nhật Bản (phần lớn

công suất được bổ sung thêm vào kể từ đó đang trong quá trình xây dựng). Thêm 6 GW khác được chạy nghiệm thu vào năm 2020 và 5,6 GW vào năm 2021. Trung Quốc chiếm phần lớn công suất được hòa lưới từ năm 2010.

2021 là năm có mức gia tăng đột biến về số lượng công trình khởi công xây dựng, với 10 đơn vị động thổ so với thông thường là từ 4 đến 5 lò mỗi năm trong những năm gần đây. Nhìn chung, có 52 lò phản ứng hiện đang được xây dựng, với tổng công suất 54 GW. Trung Quốc đang xây dựng 16,1 GW, Hàn Quốc 5,6 GW, Thổ Nhĩ Kỳ 4,4 GW, Ấn Độ 4,2 GW, Nga 3,8 GW, Vương quốc Anh 3,3 GW và các quốc gia khác cộng lại là 16,6 GW.

Trong số 31 lò phản ứng bắt đầu được xây dựng từ đầu năm 2017, 27 trong số này là thiết kế của Nga (17) hoặc thiết kế của Trung Quốc (10) với 2 lò là thiết kế của EU đang được xây dựng tại Vương quốc Anh và 2 lò do Hàn Quốc thiết kế được xây dựng tại Hàn Quốc. Nga thống trị thị trường xuất khẩu: trong khi cả 10 lò do Trung Quốc thiết kế đều đang được xây dựng tại Trung Quốc, chỉ có 3 lò do Nga thiết kế hiện bắt đầu được xây dựng ở Nga, còn phần còn lại bắt đầu được xây dựng ở Thổ Nhĩ Kỳ (3), Ấn Độ (4), Trung Quốc (4), Bangladesh (2) và Iran (1).

Giao tranh giữa Nga và Ukraine đặt ra câu hỏi về triển vọng xuất khẩu các nhà máy hạt nhân do Nga xây dựng. Phần Lan đã hủy hợp đồng xây dựng một nhà máy tại nước này được ký năm 2013, lấy lý do về sự chậm trễ và nguy cơ rủi ro tăng cao do cuộc chiến ở Ukraine.

*Cam kết phát thải ròng bằng không (net zero) khơi lại mối quan tâm đến tiềm năng của hạt nhân*

Số lượng các quốc gia đặt mục tiêu “net zero” đã tăng lên nhanh chóng trong những năm qua. Hơn 70 quốc gia, là chủ của 76% lượng khí thải CO<sub>2</sub> liên quan đến năng lượng toàn cầu, hiện đã thông qua một cam kết như vậy, bao gồm cả khí thải CO<sub>2</sub> hoặc rộng hơn là phát thải khí nhà kính. Con số này khá ấn tượng khi so với mức chỉ 6 quốc gia ký cam kết vào cuối năm 2018. Ngoài ra, hơn 60 quốc gia khác đã cam kết đạt “net zero” hoặc trung hòa carbon, nhưng không xác định khung thời gian. Những cam kết này vẫn chưa được hỗ trợ bởi những chính sách và biện pháp cụ thể cần để thực hiện chúng, nhưng chúng góp phần làm dấy nên các cuộc thảo luận về việc kết hợp các công nghệ phát thải thấp, gồm cả hiệu suất năng lượng, có khả năng giúp các quốc gia hướng tới mục tiêu này. Năng lượng hạt nhân là một trong những công nghệ được nhắc đến.

Năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện gió và điện mặt trời, thường được dự đoán là cung cấp nguồn điện lớn nhất khi các nước hướng tới tương lai “net zero”. Tuy nhiên, ngày càng có nhiều nước cũng công bố các kế hoạch hỗ trợ đầu tư vào hạt nhân mới. Ví dụ, tháng 2 năm 2022, Tổng thống Macron của Pháp tuyên bố kế hoạch xây dựng 6 lò phản ứng lớn mới bắt đầu từ năm 2028 với chi phí khoảng 50 tỷ EUR, và phương án xây dựng thêm 8 chiếc nữa vào năm 2050. Chính phủ Pháp trước đó cam kết dành 1 tỷ EUR để phát triển các lò phản ứng đổi mới sáng tạo, bao gồm một lò phản ứng mô-đun nhỏ vào năm 2030. Trung Quốc dự định tiếp tục giữ vững tốc độ xây dựng các lò phản ứng hạt nhân hiện tại nhằm đạt được mục tiêu trung

hòa carbon vào năm 2060. Tổng thống Hàn Quốc mới đắc cử tháng 5/2022, Yoon Suk Yeol, cam kết đảo ngược quá trình loại bỏ hạt nhân của đất nước bằng cách hỗ trợ kéo dài thời gian tồn tại của các cơ sở hiện tại và khởi động lại việc xây dựng tại 2 địa điểm đồng thời tìm cách xây dựng 10 nhà máy sử dụng công nghệ của Hàn Quốc ở nước ngoài tới năm 2030.

**Bảng 1. Những động thái chính sách quan trọng hỗ trợ năng lượng hạt nhân (2020-2022)**

Nước	Chính sách
Mỹ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Với vai trò là một phần của Chương trình Tín dụng hạt nhân dân sự năm 2022, khoản đầu tư trị giá 6 tỷ USD giúp bảo tồn số lượng lò phản ứng hiện có của Mỹ.</li> <li>- Khoản phân bổ 8 tỷ USD để xây dựng các trung tâm hydro sạch, bao gồm ít nhất một trung tâm dành riêng cho sản xuất hydro bằng năng lượng hạt nhân.</li> <li>- Tổng số đầu tư trị giá 3,2 tỷ USD trong 7 năm cho 2 dự án hạt nhân nằm trong Chương trình Trình diễn Lò phản ứng tiên tiến,.</li> </ul>
Canada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kế hoạch hành động SMR 2020 đưa ra các bước triển khai các lò Phản ứng mô đun nhỏ (SMR) Một số dự án đã đạt được chính quyền liên bang và tỉnh tài trợ.</li> <li>- Thông báo về một dự án SMR tại Darlington dựa trên công nghệ GE-Hitachi dự kiến được đưa vào vận hành vào cuối những năm 2020.</li> </ul>
Pháp	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Theo Kế hoạch Đầu tư Pháp 2030, thông báo kéo dài tuổi thọ của tất cả các lò phản ứng hạt nhân đủ tiêu chuẩn được kéo dài song song với đảm bảo an toàn.</li> <li>- Công bố các kế hoạch xây dựng 6 lò phản ứng lớn mới bắt đầu từ năm 2028 với chi phí khoảng 50 tỷ EUR, và phương án xây dựng 8 lò nữa vào năm 2050.</li> <li>- Khoản đầu tư 1 tỷ EUR để phát triển các lò phản ứng đổi mới, bao gồm 1 lò phản ứng mô-đun nhỏ vào năm 2030.</li> </ul>
Anh	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Được coi là một phần của tham vọng Chiến lược An ninh năng lượng năm 2022: 8 lò phản ứng lớn mới, cũng như lò phản ứng mô-đun nhỏ, để đạt được công suất phát điện hạt nhân là 24 GW vào năm 2050, tương đương khoảng 25% nhu cầu điện năng dự báo.</li> <li>- Đạo luật (Cấp tài chính) Năng lượng hạt nhân được ban hành vào năm 2022, đã đưa ra điều khoản về việc thực hiện mô hình cơ sở tài sản quy định.</li> <li>- Năm 2021, chính phủ cam kết tài trợ 210 triệu GBP phát triển một lò SMR, ứng với 250 triệu GBP đầu tư tư nhân.</li> </ul>
Bỉ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tháng 3 năm 2022, chính phủ Bỉ đã quyết định thực hiện các bước cần thiết để kéo dài tuổi thọ của 2 lò phản ứng thêm một thập kỷ đến năm 2035.</li> </ul>
Hà Lan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Các cuộc thảo luận năm 2022 về xây dựng 2 trạm điện hạt nhân mới.</li> </ul>
Ba Lan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chương trình Điện hạt nhân Ba Lan 2020 dự kiến xây dựng các lò phản ứng lớn với tổng công suất từ 6 GW đến 9 GW.</li> <li>- Năm 2022, chính phủ đã đồng ý triển khai các SMR dựa trên công nghệ Mỹ để thay thế các nhà máy đồng phát điện đốt than hiện tại.</li> </ul>
Hàn Quốc	<p>Chính phủ mới được bầu vào năm 2022 có kế hoạch hỗ trợ mở rộng vòng đời các cơ sở hiện tại, tái khởi động xây dựng tại 2 địa điểm, phát triển và tăng cường hợp tác về SMR, tìm cách xây dựng 10 nhà máy ở nước ngoài vào năm 2030.</p>
Nhật Bản	<p>Năm 2022, chính phủ tuyên bố sẽ tăng an ninh năng lượng với quan điểm khởi động lại các lò phản ứng hiện có với điều kiện là chúng an toàn.</p>
Trung Quốc	<p>Trong Kế hoạch 5 năm lần thứ 14 (2021-2025), duy trì tốc độ xây dựng ổn định đặt mục tiêu khoảng 70 GW tới 2025, so với 53 GW vào đầu năm 2022.</p>
Ấn Độ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bắt đầu xây dựng một nhóm 10 lò phản ứng mới dự kiến từ 2023 tới 2025, với tổng số 9 GW.</li> <li>- Các bước chính trị đối với việc xây dựng 6 lò phản ứng lớn sử dụng công nghệ Pháp.</li> </ul>

Nguồn: Tổng hợp

### *Mối quan tâm tới an ninh năng lượng mang lại cơ hội cho điện hạt nhân*

Triển khai điện hạt nhân làm tăng tính đa dạng của cơ cấu năng lượng, góp phần phát triển năng lượng tái tạo như gió và mặt trời, đồng thời mang lại một cơ hội - ở quy mô lớn - giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch. Cuộc khủng hoảng an ninh dầu mỏ của thập niên 1970 đã thúc đẩy làn sóng xây mới các nhà máy điện hạt nhân thế hệ đầu tiên, những nhà máy này vẫn chiếm 40% công suất hạt nhân đang hoạt động ngày nay. Nếu sắp tới có các chính sách hỗ trợ và chi phí được kiểm soát, thì điện hạt nhân ngày nay có thể sẽ lại được quan tâm.

Giao chiến giữa Nga và Ukraine làm trầm trọng thêm tình trạng căng thẳng vốn đã hiện hữu rõ tại các thị trường nhiên liệu trên toàn thế giới và đẩy giá điện lên cao. Theo Cơ quan Hợp tác và quản lý năng lượng châu Âu (ACER), giá điện bán lẻ trung bình cao hơn 30% so với cùng kỳ trong tháng 2/2022, với giá tăng mạnh nhất ở những nơi phụ thuộc nhiều vào khí đốt tự nhiên để phát điện, như Madrid (tăng 55%) và Rome (80%). Việc châu Âu thúc đẩy đa dạng hóa nguồn cung để không phụ thuộc vào Nga có thể duy trì áp lực tăng giá về giá nhiên liệu trong thời gian tới.

Năng lượng hạt nhân là một trong những lựa chọn mà các chính phủ có thể triển khai để giảm phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch cho ngành điện, đặc biệt là đối với khí đốt tự nhiên. Ví dụ, các kế hoạch của Hàn Quốc nhằm nâng tỷ lệ điện hạt nhân trong tổng sản lượng điện của Hàn Quốc có thể làm giảm mức sử dụng khí đốt tự nhiên trong ngành điện từ 5 bcm<sup>4</sup> đến 7 bcm mỗi năm trong thập kỷ tới.

Nhiều nước có lò phản ứng hạt nhân phụ thuộc vào uranium nhập khẩu để làm nhiên liệu. Tuy nhiên, nhà máy điện hạt nhân cần bổ sung nhiên liệu không thường xuyên nên làm giảm nguy cơ xảy ra những gián đoạn ngắn hạn và nhiên liệu có thể được lưu trữ trong một vài năm trước khi được sử dụng.

---

<sup>4</sup> Bcm (Billion cubic meters of natural gas); tỷ mét khối khí tự nhiên



## Hộp 2. Mức độ linh hoạt của năng lượng hạt nhân ở Pháp

Điện hạt nhân đáp ứng hơn 70% nhu cầu điện ở Pháp và chỉ thải ra 12g CO<sub>2</sub> mỗi kWh (ước tính trung bình) trong toàn bộ vòng đời (khai thác và xử lý uranium, chế tạo nhiên liệu, xây dựng, vận hành, ngừng hoạt động nhà máy và xử lý chất thải). Kể từ những năm 1980 các nhà máy điện hạt nhân ở Pháp đã được vận hành linh hoạt để cung cấp các dịch vụ phụ trợ như điều chỉnh tần số, điện áp theo yêu cầu để ổn định lưới điện theo một cách an toàn và tiết kiệm chi phí. Ngoài việc đáp ứng những thay đổi ở nhu cầu, mức độ linh hoạt của hạt nhân có thể là một giải pháp để điều chỉnh những biến động của năng lượng tái tạo, vốn dự kiến sẽ tăng lên đáng kể, mà không phụ thuộc vào các nhà máy khí, than. Trung bình mỗi lò phản ứng ở Pháp thực hiện 30 lần thay đổi công suất mỗi năm. Tuy nhiên, hầu hết các lần thay đổi này được thực hiện bởi một số lượng nhỏ các tổ máy, có thể thực hiện tới 125 lần chuyển tải lớn mỗi năm.

Tập đoàn Điện lực Pháp (EDF) dự báo rằng sự linh hoạt mà năng lượng hạt nhân của họ mang lại đủ để đáp ứng nhu cầu của hệ thống được dự đoán vào năm 2030 và 2040. Do đó, năng lượng hạt nhân, cùng với các công nghệ khác như thủy điện, ắc quy và hydro, được coi là cần thiết để tích hợp thêm nhiều nguồn năng lượng tái tạo ở Pháp.

EDF đang triển khai một chương trình đầu tư lớn gồm hỗ trợ vận hành lâu dài các nhà máy điện hạt nhân trong giai đoạn 2014-2025, với tổng ngân sách khoảng 50 tỷ euro cho chi phí tài sản cố định, bảo dưỡng và nâng cao các tiêu chuẩn an toàn. Pháp có khoảng 61GW nhà máy điện hạt nhân đã được lắp đặt, ngoài duy trì công suất phát điện carbon thấp đáng kể, còn duy trì 400.000 việc làm được hỗ trợ trực tiếp và gián tiếp bởi năng lượng hạt nhân. Khoản đầu tư vào hoạt động dài hạn này dự kiến sẽ mang lại lợi nhuận dương và đảm bảo giá điện cạnh tranh.

*Nguồn: Tập đoàn Điện lực Pháp*

## 1.2. So sánh năng lượng hạt nhân với năng lượng tái tạo

Mặc dù năng lượng tái tạo được truyền thông nhận định là tương lai của năng lượng, nhưng trong nhiều cuộc thảo luận, năng lượng hạt nhân cũng đang ngày càng được coi là một phần thiết yếu của cơ cấu năng lượng. Dù cả hạt nhân và năng lượng tái tạo đều là nguồn năng lượng sạch, nhưng năng lượng tái tạo (thủy điện, năng lượng mặt trời, gió và khí sinh học) chiếm gần 29% hỗn hợp năng lượng, trong khi hạt nhân chỉ chiếm khoảng 10%. Phân tích năng lượng carbon thấp cho thấy 11,4% đến từ năng lượng tái tạo và chỉ 4,3% đến từ năng lượng hạt nhân.

Thế giới đang kêu gọi giảm lượng khí thải với nhiều quốc gia ký kết cam kết “net zero” của Liên hợp quốc. Theo một cuộc khảo sát của Trung tâm Nghiên cứu Pew được thực hiện vào đầu năm 2022, đa số người Mỹ (69%) ủng hộ việc thực hiện các bước để trở nên trung hòa carbon vào năm 2050. Trong khi 72% dân số muốn có thêm nhiều năng lượng mặt trời và gió, thì chỉ gần một phần ba muốn có nhiều năng lượng hạt nhân. Mặc dù cả năng lượng tái tạo và hạt nhân đều không phát thải, nhiều người lạc quan về năng lượng tái tạo, nhưng lại dè dặt khi nói đến hạt nhân.

### *Chi phí của điện hạt nhân so với năng lượng tái tạo*

Do chi phí xây dựng cao, nên năng lượng hạt nhân đắt hơn các nguồn năng lượng tái tạo. Về mặt xây dựng và lắp đặt, hạt nhân là dạng năng lượng tốn kém nhất, trong khi năng lượng tái tạo ít tốn kém nhất. Nhiều người hy vọng rằng nhiệt hạch có thể giảm chi phí, nhưng theo báo cáo trên tạp chí Nature, ngay cả khi các lò phản ứng nhiệt hạch tiên tiến được triển khai thương mại, thì chúng vẫn sẽ không thể cạnh tranh với năng lượng gió, mặt trời và địa nhiệt về

khía cạnh giá cả.

### *Năng lượng mặt trời và gió so với năng lượng hạt nhân*

Tổ chức David Suzuki<sup>5</sup> tuyên bố năng lượng hạt nhân đắt gấp 10 lần so với năng lượng gió và mặt trời, trong khi Báo cáo Triển vọng Năng lượng hàng năm năm 2022 của Cơ quan Thông tin Năng lượng Mỹ chỉ ra rằng chi phí điện từ các nhà máy điện hạt nhân tiên tiến cao gấp đôi chi phí của các trang trại năng lượng mặt trời. Một phân tích về chi phí sản xuất điện quy dẫn (LCOE) của ngân hàng đầu tư Lazard chỉ ra rằng năng lượng gió và mặt trời rẻ hơn năng lượng hạt nhân năm lần. Báo cáo cũng kết luận rằng năng lượng tái tạo vẫn rẻ hơn ngay cả khi bao gồm cả chi phí lưu trữ và chi phí lưới mạng. Chi phí công nghệ tích trữ giảm đi cũng góp phần làm giảm giá năng lượng mặt trời và gió.

Do chi phí của năng lượng tái tạo ngày càng giảm, nên chi phí tương đối của năng lượng hạt nhân lại tăng lên. Từ năm 2009 đến năm 2021, chi phí của năng lượng tái tạo như gió và mặt trời đã giảm 90%, trong khi chi phí của năng lượng hạt nhân tăng 33%. Mức giảm góp trung bình hàng năm trong 5 năm của năng lượng mặt trời quy mô tiện ích là 8% và gió ngoài khơi là 4%. Năng lượng mặt trời ngày càng rẻ hơn so với nhiên liệu hóa thạch và dự kiến giá sẽ tiếp tục giảm khi quy mô công nghệ được mở rộng.

Mặc dù năng lượng tái tạo là một lựa chọn hấp dẫn, nhưng cũng có những lập luận có lý ủng hộ cho năng lượng hạt nhân. Khi đánh giá chi phí kinh tế và môi trường của các loại hình sản xuất năng lượng khác nhau, thì chúng ta cũng nên tính đến tuổi thọ của công nghệ. Các nhà máy điện hạt nhân có thể vận hành trong 40 năm (một số thiết kế hạt nhân tiên tiến có thể kéo dài 60 năm) còn các tấm pin mặt trời chỉ có tuổi thọ tối đa 30 năm và tua-bin gió có tuổi thọ trung bình 25 năm. Chi phí năng lượng ở Pháp và Đức là bằng chứng cho thấy năng lượng hạt nhân làm giảm chi phí điện cho người tiêu dùng: chi phí điện cho người tiêu dùng ở Pháp, quốc gia sử dụng 70% năng lượng từ hạt nhân, rẻ hơn nhiều so với Đức, quốc gia đã loại bỏ hạt nhân khỏi cơ cấu năng lượng một cách hiệu quả.

### *Ưu điểm của điện hạt nhân so với năng lượng tái tạo*

Năng lượng hạt nhân có lợi thế hơn năng lượng tái tạo về độ tin cậy, phát thải khí nhà kính, sử dụng đất và chất thải. Hạt nhân đáng tin cậy hơn nhiều (có thể điều chuyển đi) so với năng

#### **Hộp 3. Đầu tư và tài trợ hạt nhân mới ở Ba Lan**

Chính sách năng lượng năm 2021 của Ba Lan dự kiến đầu tư 410 tỷ USD (1600 tỷ PLN) vào quá trình chuyển đổi năng lượng trong giai đoạn 2021-2040, bao gồm xây dựng 6-9 GW công suất phát điện hạt nhân đáp ứng nhu cầu điện ngày càng tăng trong khi vẫn đạt được các mục tiêu về khí hậu và duy trì giá cả ổn định. Phân tích kinh tế vĩ mô ước tính rằng quy mô đầu tư vào điện hạt nhân - khoảng 40 tỷ USD - sẽ tạo ra hoạt động kinh tế và việc làm đáng kể, 10.000-20.000 việc làm toàn thời gian (cho 6 GW), không chỉ chủ yếu trong lĩnh vực xây dựng và sản xuất máy móc và thiết bị kỹ thuật điện mà còn trong thương mại bán buôn, bán lẻ và nông nghiệp thông qua chi tiêu phát sinh và gián tiếp.

*Nguồn: Chính sách Năng lượng của Ba Lan tới 2040, Bộ Khí hậu và Môi trường Ba Lan*

<sup>5</sup> <https://david Suzuki.org/story/is-smaller-better-when-it-comes-to-nuclear/>

lượng tái tạo như gió và mặt trời. Các nhà máy điện hạt nhân tạo ra năng lượng không phụ thuộc vào thiên nhiên (gió, ánh nắng).

Hạt nhân cũng là một trong những nguồn năng lượng sạch nhất. Nghiên cứu gần đây được công bố trên “Tập chí Sản xuất sạch hơn”<sup>6</sup> cho thấy phát thải khí nhà kính và sử dụng tài nguyên thiên nhiên liên quan đến sản xuất điện hạt nhân cũng tương tự như của năng lượng tái tạo. Một phân tích của Ủy ban châu Âu chỉ ra rằng về mặt sản xuất toàn chu kỳ, lượng phát thải từ hạt nhân ngang bằng với gió. Các nghiên cứu khác cũng kết luận rằng hạt nhân thậm chí còn có thể sạch hơn năng lượng mặt trời. Tổ chức Orano<sup>7</sup> tuyên bố rằng năng lượng hạt nhân tạo ra lượng khí nhà kính ít hơn bốn lần so với năng lượng mặt trời.

Điện hạt nhân cũng cần ít đất hơn rất nhiều so với điện gió và điện mặt trời. Theo một số đánh giá, điện hạt nhân cần diện tích đất bằng 1/2.000 diện tích điện gió và 1/400 diện tích đất điện mặt trời. Dữ liệu của chính phủ Mỹ chỉ ra rằng một trang trại điện gió 1.000 megawatt cần diện tích đất gấp 360 lần so với một cơ sở điện hạt nhân có công suất tương tự, còn một nhà máy năng lượng mặt trời cần diện tích gấp 75 lần.

**Bảng 2: Một số so sánh giữa Lò hạt nhân nhỏ và Pin năng lượng mặt trời**

	Lò hạt nhân nhỏ	Tấm pin năng lượng mặt trời
Có thể sản xuất 1500 MW trong chưa tới 1 hec-ta	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Có thể sản sinh ra nhiên liệu của chính nó từ thorium, uranium chưa sử dụng, hoặc plutonium	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tạo ra điện vào ban đêm	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Có khả năng sử dụng toàn bộ công suất của nó mà không phụ thuộc vào vị trí của mặt trời	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Khử muối ở nước	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tạo ra đồng vị phóng xạ để điều trị ung thư	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kết nối trực tiếp với lưới điện, không cần bộ chuyển đổi điện	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sản xuất ra những khối lượng lớn điện với giá rẻ để cạnh tranh trực tiếp với nhiên liệu hóa thạch	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tuổi thọ thiết kế 60 năm	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

*Nguồn: Tổng hợp*

Một vấn đề nữa là, mặc dù hiện trên thế giới có những lo ngại hợp lý về chất thải hạt nhân, nhưng chất thải của năng lượng tái tạo cũng gây ra những lo ngại nhất định. Điện gió và mặt trời tạo ra một loạt chất thải hóa học bao gồm các kim loại nặng độc hại như cadmium, asen,

<sup>6</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262202131X>

<sup>7</sup> <https://www.orano.group/en/unpacking-nuclear/is-nuclear-power-a-renewable-energy>

crom và chì. Trong khi chất thải hạt nhân có thể duy trì mức độ phóng xạ trong hàng nghìn năm, thì chất thải kim loại có liên quan đến năng lượng tái tạo sẽ vẫn nguy hiểm mãi mãi. Có lẽ điều quan trọng nhất là khối lượng chất thải hạt nhân rất nhỏ so với khối lượng chất thải tái tạo. Chất thải hạt nhân bằng 1/10.000 chất thải do năng lượng mặt trời tạo ra và 1/500 chất thải do gió tạo ra.

### **1.3. Năng lực cạnh tranh của năng lượng hạt nhân**

Năng lượng hạt nhân đối với khử carbon các hệ thống năng lượng

Giảm phát thải từ sản xuất điện hiệu quả về mặt chi phí trong khi vẫn phải đảm bảo an ninh năng lượng sẽ cần một khuôn khổ thị trường ưu tiên cao về cả mức sản sinh phát thải thấp lẫn đầy đủ các dịch vụ của hệ thống điện. Chuyển đổi năng lượng yêu cầu chuyển khỏi việc sử dụng than và khí tự nhiên sang sử dụng các công nghệ phát thải thấp trong ngành điện. Những đặc tính thuận lợi của năng lượng hạt nhân – đặc biệt là phát thải thấp, khả năng điều phối và tính linh hoạt – sẽ nâng cao giá trị của nó đối với các hệ thống điện do chúng được khử carbon dần dần. Đặc biệt, khả năng điều phối sẽ ngày càng trở nên có giá trị do năng lượng tái tạo luôn thay đổi, vốn không thể điều phối được và kém linh hoạt hơn các nguồn phát nhiệt, lại đang chiếm phần ngày càng tăng trong sản xuất điện. Các nguồn linh hoạt khác như thủy điện hoặc địa nhiệt gặp khó khăn về khả năng mở rộng hoặc các vùng chấp nhận, hoặc vẫn chưa chứng tỏ có tính thương mại như trong trường hợp hydro điện phân có CCUS<sup>8</sup>.

Vì những lý do này, thị trường điện cần được hoạch định để đảm bảo giá trị kinh tế của điện hạt nhân, cùng với các công nghệ phát thải thấp khác, được phản ánh hoàn toàn vào các tín hiệu giá nhằm khuyến khích đầu tư với tâm thế không phân biệt. Nếu không có hoạch định thị trường tốt, các chính phủ sẽ cần phải dựa vào mức độ các ưu đãi khác lớn hơn, chẳng hạn như các khoản thanh toán được xác định theo thủ tục hành chính, để khiến những khoản đầu tư này diễn ra. Việc này vốn thường mang lại kết quả với chi phí cao hơn.

Năng lượng hạt nhân cũng có thể góp phần làm tăng lượng nhiệt thải thấp và sản xuất hydro phát thải thấp. Sự cạnh tranh giữa các phương án công nghệ để cung cấp cho các thị trường đang phát triển này khác biệt đáng kể hơn trong ngành điện và tác động của những cân nhắc theo đặc thù địa phương cụ thể sẽ quan trọng hơn đối với việc đưa ra quyết định đầu tư. Khai thác tiềm năng này có thể góp phần củng cố các phương án kinh doanh cho lò phản ứng mới bằng cách tăng doanh thu và giảm nguy cơ phải cắt giảm sản xuất trong các hệ thống có tỷ lệ năng lượng tái tạo biến động cao.

Chi phí xây dựng lò phản ứng hạt nhân mới cần giảm mạnh để cạnh tranh giành thêm thị phần với năng lượng mặt trời và gió

Chi phí xây dựng các lò phản ứng hạt nhân mới sẽ rất quan trọng đối với vai trò trong tương lai của điện hạt nhân trong quá trình chuyển đổi năng lượng sạch toàn cầu. Với chi phí

---

<sup>8</sup> CCUS: Thu giữ, sử dụng và lưu trữ CO<sub>2</sub>

giả định ở kịch bản NZE (kịch bản phát thải ròng bằng 0 tới 2050), hạt nhân đóng vai trò bổ sung, góp phần ổn định hệ thống, mở rộng các nguồn phát thải thấp và hỗ trợ ở những nơi năng lượng tái tạo bị hạn chế. Tuy nhiên, để cạnh tranh trực tiếp với điện gió và tấm điện quang mặt trời, xét cả chi phí và giá trị hệ thống cho từng công nghệ, thì chi phí xây dựng điện hạt nhân mới sẽ cần phải giảm xuống còn 2.000 USD/kW (đồng USD thời điểm năm 2020) hoặc thấp hơn để đạt công suất sung vào năm 2030. Với chi phí xây dựng này, Chi phí LCOE<sup>9</sup> của điện hạt nhân sẽ ở mức khoảng 40-60 USD/MWh, phụ thuộc chủ yếu vào chi phí tài chính. Đầu thấp hơn trong mức này tương ứng với chi phí vốn sử dụng bình quân (WACC) là 4%, đòi hỏi rủi ro cụ thể theo dự án và công nghệ cần được giảm thiểu hoặc chuyển giao cho các bên khác. Các biện pháp hỗ trợ phải trung lập về mặt công nghệ bất cứ khi nào được chấp nhận và khả thi để đảm bảo sự chuyển đổi năng lượng hợp lý nhất. Thời gian xây dựng và yếu tố công suất, vốn cũng ảnh hưởng đến LCOE, sẽ khác nhau tùy theo địa phương. Ví dụ, thời gian xây dựng ngắn hơn và các yếu tố công suất dự kiến cao hơn dẫn đến LCOE thấp hơn ở Trung Quốc.

Khi chi phí xây dựng hạt nhân gần tới mức 4.000 USD/kW, chi phí LCOE sẽ tăng vọt từ 60 USD/MWh lên 100 USD/MWh, vượt xa chi phí của các dự án điện mặt trời và gió, bao gồm cả lưu trữ, trong hầu hết các dự án. Chi phí LCOE được điều chỉnh giá trị (VALCOE) của điện hạt nhân rất giống với chi phí LCOE ở Liên minh Châu Âu, Trung Quốc và Mỹ do đóng góp của điện hạt nhân vào nguồn cung cấp điện phát thải thấp, mức độ đầy đủ và linh hoạt của hệ thống điện gần bằng mức trung bình của toàn bộ số lượng nhà máy điện.

Kéo dài tuổi thọ hạt nhân sẽ mang lại nguồn điện phát thải thấp có tính cạnh tranh, đặc biệt là ở Châu Âu và Mỹ. Chi phí vốn cho hầu hết những dự án kéo dài nằm trong khoảng từ 500 USD/kW đến 1.100 USD/kW tới năm 2030, đạt mức chi phí LCOE thường dưới 40 USD/MWh. Với chi phí này, việc kéo dài tuổi thọ hạt nhân mang tính cạnh tranh với điện mặt trời và gió vốn có chi phí thấp trong hầu hết các điều kiện, bất chấp giá điện mặt trời và điện gió giảm mạnh. Kéo dài tuổi thọ đóng góp phần tương tự vào các dịch vụ hệ thống điện như với các dự án mới, vì vậy chi phí VALCOE và LCOE của chúng không có mấy khác biệt.

Khả năng cạnh tranh của hạt nhân cũng phụ thuộc vào triển vọng cắt giảm hơn nữa trong chi phí sản xuất điện từ ắc quy năng lượng mặt trời và gió. Ắc quy năng lượng mặt trời là nguồn điện rẻ nhất ở hầu hết các vùng ngày nay; nó có sẵn và có thể triển khai diện rộng. Chi phí LCOE của năng lượng mặt trời được dự đoán sẽ giảm hơn 40% vào năm 2030 trong kịch bản NZE, với hầu hết dự án quy mô tiện ích có chi phí khoảng 20 USD /MWh đến 40 USD/MWh. Tuy nhiên, sản lượng biến động của pin mặt trời không phù hợp lắm với các mô hình nhu cầu điện, được phản ánh ở chi phí VALCOE cao hơn đáng kể so với chi phí LCOE của nó.

Giống như năng lượng mặt trời, năng lượng gió có sẵn và có thể mở rộng ở hầu hết các thị trường. Nó là công nghệ trưởng thành hơn năng lượng mặt trời, mặc dù vẫn tiếp tục đổi mới.

---

<sup>9</sup> Chi phí sản xuất điện quy dẫn

Như với điện mặt trời, chi phí LCOE của hầu hết các dự án điện gió trên bờ dự kiến sẽ giảm xuống từ 30 USD/MWh tới 70 USD/MWh vào năm 2030. Sản lượng gió phụ thuộc vào điều kiện gió, thường không phù hợp với mô hình nhu cầu, vì vậy chi phí VALCOE của điện gió nhìn chung cao hơn nhiều so với chi phí LCOE của nó, khiến nó kém cạnh tranh hơn nếu chỉ tính riêng chi phí LCOE. Kết hợp lưu trữ với điện gió trên bờ có thể làm giảm VALCOE, đặc biệt ở những nơi tỷ lệ điện gió trong tổng sản lượng điện cao, chẳng hạn như ở Liên minh Châu Âu.

Hạt nhân có khả năng cạnh tranh tốt hơn so với các phương án phát thải thấp có khả năng được điều phối khác

Chi phí xây dựng các nhà máy điện hạt nhân mới cũng cần giảm đi ít nhiều để cạnh tranh với các nguồn điện phát thải thấp khác. Ở hầu hết các nơi, chi phí xây dựng hạt nhân sẽ cần giảm 2.000 USD/kW đến 3.000 USD/kW (đồng USD năm 2020) để cạnh tranh với các nguồn có khả năng điều phối khác, bao gồm các nhà máy thủy điện, năng lượng sinh học và nhiên liệu hóa thạch được trang bị CCUS, mặc dù tiềm năng của những nguồn có thể điều phối thay thế này có thể bị hạn chế ở một số khu vực. Tùy thuộc vào chi phí tài chính, việc này sẽ mang lại LCOE cho điện hạt nhân từ 40 USD/MWh tới 80 USD/MWh. Trong số các nguồn này, chi phí LCOE là thước đo tốt cho khả năng cạnh tranh của chúng vì khả năng điều phối và giá trị của chúng đối với hệ thống điện là như nhau. Mặc dù sử dụng nhiên liệu hóa thạch có CCUS tiềm ẩn nguy cơ biến động giá lớn, nhưng phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch trong hệ thống năng lượng toàn cầu sẽ làm giảm áp lực lên giá trong dài hạn.

Tiềm năng xây dựng thêm công suất thủy điện trên toàn cầu, vốn là nguồn điện phát thải thấp với chi phí thấp trong nhiều thập kỷ, đang bị hạn chế. Chi phí và hiệu suất cuối của các nhà máy thủy điện phụ thuộc rất nhiều vào các yếu tố đặc thù của dự án. Chi phí LCOE cho các dự án mới dự kiến sẽ còn 40 USD/MWh đến 100 USD/MWh vào năm 2050 ở NZE, với những dự án mới ngày càng tập trung ở một vài khu vực có tiềm năng còn sót lại và có điều kiện địa điểm tốt nhất. Những nguồn tài nguyên chất lượng cao nhất thì đã được phát triển từ lâu và nhiều vùng không còn khả năng do lo ngại về môi trường và tác động xã hội. Mở rộng thủy điện với các hồ chứa bị hạn chế chủ yếu ở Trung Quốc, Đông Nam Á và Châu Phi.

Các nhà máy điện năng lượng sinh học có khả năng được mở rộng quy mô và có thể được xây dựng ở hầu hết các địa điểm, nhưng bị hạn chế bởi chi phí tương đối cao. Trường hợp đặc thù trong đó nguồn cung sinh khối nội địa bền vững có giới hạn và cần phải nhập khẩu viên sinh khối, chẳng hạn như ở Châu Âu. Kết quả là LCOE của các nhà máy này thường vượt quá 150 USD/MWh tới năm 2050 trong kịch bản NZE. Mặc dù mức khả dụng của nhiên liệu chi phí thấp dưới dạng phế phẩm nông nghiệp có thể cải thiện đáng kể tính kinh tế của các nhà máy điện năng lượng sinh học, nhưng những dự án như vậy thường có quy mô nhỏ và đóng góp tổng thể của chúng vào sản xuất điện còn khiêm tốn.

Các nhà máy điện chạy bằng khí tự nhiên được trang bị CCUS có tiềm năng nằm trong số nguồn điện có lượng phát thải thấp rẻ nhất có thể điều phối được. Một yếu tố quan trọng là chi

phí của thiết bị thu hồi carbon, vẫn đang trong giai đoạn phát triển và thí điểm trong hơn một thập kỷ. Các dự án thương mại quy mô hoàn chỉnh cần khẩn cấp giảm chi phí và giảm bớt những yếu tố không chắc chắn của công nghệ. Hiện tại đã có những dấu hiệu tiên bộ khi hỗ trợ chính sách cho sự phát triển của CCUS được mở rộng, ví dụ như ở Mỹ và Canada, và số lượng các dự án đang được phát triển trên toàn thế giới tăng lên. Lợi ích lan tỏa sẽ khiến cho thiết bị thu giữ khả dụng cho ngành công nghiệp trong các ứng dụng khó cắt giảm, chẳng hạn như sản xuất sắt và thép.

Một yếu tố quan trọng khác là giá khí đốt tự nhiên. Chiến tranh giữa Nga và Ukraina gây ra áp lực tăng giá trong thời gian tới; nếu mức giá cao vẫn tiếp diễn hoặc nếu công nghệ thu hồi carbon tiến triển chậm, thì chi phí phát điện tại các nhà máy điện chạy bằng khí đốt có CCUS sẽ cao hơn đáng kể, khiến cho điện hạt nhân có tính cạnh tranh tương đối cao hơn. Nhưng nếu giá ở một số khu vực quay trở lại các mức trong khoảng từ 2 USD/mmBtu<sup>10</sup> đến 6 USD/mmBtu, thì các nhà máy điện chạy bằng khí đốt có CCUS có thể phát điện với chi phí dưới 70 USD/MWh vào năm 2030.

Khả năng cạnh tranh của các nhà máy điện đốt than được trang bị CCUS so với điện hạt nhân phụ thuộc vào việc những nhà máy đó là mới hay được trang bị thêm. Các nhà máy than mới, giống những nhà máy điện hạt nhân mới, được xây dựng tương đối tốn kém nhưng hoạt động hầu hết thời gian và cung cấp một bộ dịch vụ hệ thống. Với những cải tiến công nghệ, LCOE dự kiến của các dự án CCUS than mới nằm trong khoảng 80 USD/MWh đến 110 USD/MWh tới năm 2040. Lắp thêm thiết bị thu hồi carbon cho các nhà máy hiện có là một cách để một số nhà máy điện phát thải cao nhất trên thế giới trở thành nguồn phát thải thấp. Việc này có thể có chi phí thấp hơn nhiều, đặc biệt đối với các nhà máy xây dựng gần đây được thiết kế để sẵn sàng với CCUS, mặc dù mạng lưới và kho lưu trữ CO<sub>2</sub> cần phải được phát triển song song với các cơ sở riêng lẻ, vốn làm phức tạp việc sử dụng công nghệ CCUS. Một giải pháp thay thế là đóng cửa vĩnh viễn các nhà máy than hiện có và tái sử dụng các địa điểm này để xây dựng các dự án hạt nhân mới, có quy mô phù hợp với không gian và khai thác kết nối lưới điện hiện có. Phương án này có tiềm năng chomột lượng lớn công suất hạt nhân mới, rất có thể ở dạng lò phản ứng mô-đun nhỏ.

Hydro và amoniac có hàm lượng carbon thấp, về nguyên tắc có thể được sử dụng làm đầu vào cho các nhà máy điện chạy bằng khí đốt và than để cung cấp điện có khả năng điều phối, về cơ bản là những chất mang năng lượng phát thải thấp – chứ không phải nguồn – và do đó không phải là đối thủ cạnh tranh chính của điện hạt nhân. Thay vì thế, chúng có thể bổ sung cho điện hạt nhân nếu chúng được sử dụng để sản xuất những nhiên liệu đó (than, khí đốt) với vai trò là một cách lưu trữ năng lượng điện để sau đó sử dụng nhằm đáp ứng nhu cầu trong thời gian cao điểm. Hydro và amoniac vẫn chưa được sử dụng ở quy mô lớn trong ngành điện và chỉ bắt đầu được chú ý tới sau năm 2030 trong kịch bản NZE. Nguyên nhân là do thị phần

---

<sup>10</sup> 1 mmBtu = 1 triệu BTU; Btu: đơn vị nhiệt trị của nước Anh

của năng lượng tái tạo mang tính biến động đạt mức cao và sự thay đổi theo mùa của gió và các tấm pin mặt trời tạo ra nhu cầu mới về nguồn điện linh hoạt. Là những nhiên liệu tương đối đắt tiền (chủ yếu do tổn thất năng lượng lớn trong quá trình sản xuất và sử dụng chúng), hydro và amoniac phù hợp nhất với đáp ứng nhu cầu cao điểm và cung cấp thời gian sử dụng lâu dài hoặc lưu trữ theo mùa. Trong khi điện hạt nhân quy mô lớn cũng có thể đóng góp vào nhu cầu của hệ thống lúc cao điểm, nó cũng rất phù hợp để hoạt động ở chế độ tải cơ sở.

Hạt nhân có những thuộc tính an ninh năng lượng quan trọng đối với lộ trình tới net zero

Quá trình chuyển đổi sang phát thải ròng bằng 0 đòi hỏi phải có sự thay đổi căn bản về cách thức cung cấp nhiều dịch vụ hệ thống điện khác nhau nhằm đảm bảo vận hành hệ thống an toàn, linh hoạt và ổn định. Ngoài việc cung cấp điện, các dịch vụ này bao gồm tính ổn định của hệ thống, tăng tốc và các hình thức linh hoạt ngắn hạn khác cũng như công suất tại thời điểm nhu cầu cao nhất. Trong khi các nguồn năng lượng tái tạo biến động, chủ yếu là gió và năng lượng mặt trời, trở thành nguồn năng lượng hiệu quả nhất về mặt chi phí trên cơ sở LCOE ở nhiều địa phương và do đó sản xuất hầu hết điện trong các hệ thống đã khử carbon hoàn toàn ở kịch bản NZE, thì các nguồn sản xuất điện khác - bao gồm cả hạt nhân ở một số nước - cũng rất cần thiết để vận hành an toàn hệ thống.

Trung Quốc đưa ra một ví dụ về vai trò của điện hạt nhân trong việc đảm bảo an ninh điện ở một hệ thống khử carbon. Tháng 9/2020, chính phủ Trung Quốc công bố cam kết đạt mức phát thải CO<sub>2</sub> cao nhất trước năm 2030 và đạt được mức trung hòa carbon trước năm 2060. IEA đã công bố một báo cáo vào tháng 9/2021, có tiêu đề “*Lộ trình của ngành năng lượng hướng tới trung hòa carbon ở Trung Quốc*”, trình bày một kịch bản trong đó mục tiêu này đạt được dựa trên việc lập mô hình chi tiết về lĩnh vực điện và các lĩnh vực khác. Trong kịch bản này (đạt mức phát thải ròng bằng 0 muộn hơn ở kịch bản NZE), năng lượng tái tạo cung cấp 58% tổng nguồn cung điện vào năm 2060, tăng từ khoảng 4% vào năm 2020. Tuy nhiên, chúng chỉ đóng góp khoảng 8% công suất cao điểm. Đối với lưu trữ, ứng phó nhu cầu, thì thủy điện và các nhà máy có CCUS mỗi bên sẽ đóng góp nhiều hơn. Tỷ phần của điện hạt nhân trong tổng sản lượng điện năm 2060 là khoảng 10% vào năm 2060, thấp hơn nhiều so với năng lượng tái tạo, tuy nhiên hạt nhân có mức đóng góp tương đương để đáp ứng nhu cầu công suất cao nhất. Hạt nhân cũng đóng góp nhiều hơn cho các dịch vụ ổn định, bao gồm cả mức độ ì, vốn được dự kiến đạt 48% vào năm 2060 so với mức chỉ 3% vào năm 2020.

Sự chuyển đổi sẽ làm thay đổi cơ cấu tối ưu của các tài nguyên sản xuất điện

Hậu quả chính của việc tăng tỷ trọng năng lượng gió và năng lượng mặt trời trong tổng sản lượng điện là sự gia tăng độ biến động của tải ròng - tổng tải trừ đi sản lượng gió và mặt trời - trong tất cả các nấc thời gian, từ phút đến giờ, ngày, tuần và mùa, cũng như những thay đổi lớn ở hồ sơ tải trọng ròng. Nhà máy điện gió và mặt trời luôn sản xuất điện khi khả dụng xét từ chi phí vận hành cực kỳ thấp của chúng. Tải ròng đại diện cho nhu cầu phải được đáp ứng bằng các nguồn có thể điều phối được, bao gồm cả điện hạt nhân, nhà máy nhiệt điện, thủy điện, tích trữ hoặc nhập khẩu từ bên ngoài hệ thống. Nhu cầu này chắc chắn tăng lên khi có thêm nhiều



năng lượng tái tạo được bổ sung vào hệ thống. Mức độ thực tế phụ thuộc vào các yếu tố khí hậu và mùa ở địa phương, cũng như cơ cấu của năng lượng mặt trời và gió. Ví dụ, vào mùa hè, sản xuất điện mặt trời ở các địa phương ấm áp có xu hướng khớp với nhu cầu điện, vì nhu cầu làm mát đạt đỉnh trong thời gian ban ngày, làm giảm tải ròng, tức là lượng điện cần thiết từ các nhà máy có thể điều phối được. Điều ngược lại có thể đúng vào mùa đông, khi nhu cầu có thể cao nhất vào buổi tối khi mặt trời đã lặn.

Hàn Quốc minh họa cho hiện tượng này trong báo cáo “*Cải cách thị trường điện của Hàn Quốc để đạt được phát thải ròng bằng không*” của IEA, bằng cách thực hiện mô hình hóa hệ thống cấp điện chi tiết của lộ trình hướng tới mức phát thải CO<sub>2</sub> liên quan đến năng lượng về mức bằng 0 vào năm 2050. Trong kịch bản này, tỷ lệ năng lượng tái tạo trong tổng điện năng tăng từ 4% năm 2020 lên 50% vào năm 2035, làm tăng phạm vi tải ròng theo giờ lên gấp bốn lần.

Khi hệ thống điện ngày càng phải trải qua những mức biến động rõ rệt theo giờ và nhỏ hơn giờ (mức tăng và giảm theo thời gian thực trong việc cung cấp điện để đáp ứng với những thay đổi về tải điện) và sự khác biệt lớn hơn giữa nhu cầu tối thiểu và tối đa hàng ngày, thì nhu cầu về mức linh hoạt trong ngày của bên cung và cầu sẽ tăng lên. Mức linh hoạt này có thể được thực hiện bởi hệ thống bơm tích năng và ắc quy, cũng như các kế hoạch ứng phó nhu cầu, bao gồm sạc phương tiện thông minh, thiết bị và bộ điều nhiệt. Sự cố của các giai đoạn trong ngày càng thường xuyên với giá rất thấp hoặc thậm chí bằng 0, khi tải điện được đáp ứng hoàn toàn bằng năng lượng tái tạo có chi phí cận biên bằng 0, sẽ mang lại cơ hội cho các ngành công nghiệp sử dụng nhiều năng lượng điều chỉnh lịch trình sản xuất của mình một cách linh hoạt để giảm chi phí của họ.

Sự kết hợp tối ưu giữa công suất có thể điều phối để đáp ứng đường cầu biến đổi ở bất kỳ một hệ thống nhất định sẽ được xác định bởi chi phí tương đối của nhiên liệu đầu vào và vốn và chi phí vận hành của từng loại nhà máy, có tính đến các hệ số công suất của chúng. Do mỗi phương án phát điện có sự kết hợp giữa chi phí cố định và chi phí biến đổi, nên các nhà máy có chi phí cố định cao nhưng chi phí vận hành thấp hoạt động tiết kiệm nhất ở các hệ số công suất cao. Những nhà máy với chi phí cố định thấp còn chi phí vận hành cao sẽ hoạt động tiết kiệm hơn trong giai đoạn cao điểm. Ví dụ, ở Hàn Quốc, tải trọng ròng hiện nay được đáp ứng bởi cơ cấu gồm dầu, khí tự nhiên, than, thủy điện và điện hạt nhân theo thứ tự sử dụng tăng dần. Do tỷ phần của gió và năng lượng mặt trời tăng lên, hình dạng và mức độ thay đổi của đường cong thời gian tải ròng ảnh hưởng đến cách thức đáp ứng tải ròng một cách đáng kể, vì chi phí của các công nghệ phát thải thấp có thể điều phối đã giảm tương đối so với các nguồn phát thải cao như than và khí đốt.

Cách tiếp cận “đường cong sàng lọc” cho thấy cách các nguồn tài nguyên phát điện có thể điều phối này bổ sung cho nhau trong kịch bản phát thải ròng bằng 0 của Hàn Quốc. Đường cong sàng lọc này thể hiện tổng chi phí của một nguồn tài nguyên, bao gồm chi phí vốn, chi phí vận hành và chi phí bảo trì, chi phí nhiên liệu hàng năm, và đưa ra giải pháp chi phí thấp

nhất ở từng hệ số công suất dọc theo đường cong thời gian tải rỗng. Sau đó, tài nguyên có chi phí thấp nhất sẽ được phản ánh vào đường cong tải rỗng để xác định cả lượng công suất cần thiết lẫn tổng năng lượng dự kiến được cung cấp bởi mỗi nguồn tài nguyên. Trong kịch bản, năng lượng hạt nhân chiếm phần lớn nguồn điện có thể điều phối được vào năm 2035, trong khi than và khí đốt được sử dụng làm nguồn cao điểm.

Trong các hệ thống khác có chi phí xây dựng hạt nhân cao hơn còn giá than và khí đốt thấp hơn, thì phần đóng góp của hạt nhân sẽ thấp hơn còn phần đóng góp của than và/hoặc khí đốt sẽ cao hơn. Trong các hệ thống điện đã khử carbon hoàn toàn, các nguồn năng lượng cao điểm có thể bao gồm nhiên liệu carbon thấp như hydro điện phân và amoniac còn nguồn trung gian (tải trung bình) có thể là các nhà máy than hoặc khí đốt có CCUS.

Lợi ích khí thải thấp của điện hạt nhân được thể hiện rõ ràng qua định giá carbon

Trong một hệ thống cạnh tranh, điều quan trọng là chi phí phát thải CO<sub>2</sub> được phản ánh trong giá điện được sản xuất từ nhiên liệu hóa thạch để ưu tiên các phương án phát điện sản sinh ra ít hoặc không phát thải, chẳng hạn như điện hạt nhân. Việc này khuyến khích có thêm hệ thống năng lượng khử carbon với chi phí thấp nhất. Giá carbon là cơ chế cơ bản để đạt được điều này. Định giá carbon ảnh hưởng đến thứ tự ưu tiên của phát điện, khuyến khích hành vi tiết kiệm khí thải tại bất kỳ thời điểm và địa điểm nào thông qua chuyển đổi nhiên liệu và lưu trữ năng lượng tái tạo để sử dụng sau này. Về nguyên tắc, gộp cả giá carbon vào giá thị trường bán buôn, thông qua hệ thống giao dịch phát thải hoặc thuế carbon, sẽ hiệu quả kinh tế hơn các hình thức khuyến khích khử carbon khác vì nó nhắm trực tiếp vào phát thải và không phân biệt các công nghệ, dù ở phía cung hay phía cầu (hiệu quả năng lượng và đáp ứng nhu cầu), ngoài việc dựa trên lượng khí thải CO<sub>2</sub>.

Điện hạt nhân luôn đứng sau điện gió và năng lượng mặt trời trong thứ tự ưu tiên ở thị trường bán buôn, ngay cả khi có định giá carbon, vì điện gió và mặt trời có chi phí cận biên bằng 0. Tuy nhiên, đưa ra định giá carbon hoặc tăng giá CO<sub>2</sub> có tác động đẩy chi phí của các máy phát điện chạy bằng nhiên liệu hóa thạch tăng lên, làm tăng giá bán buôn điện và tăng doanh thu mà các nhà máy hạt nhân nhận được mà không làm thay đổi chi phí của chúng. Trong một ví dụ minh họa, sự thay đổi trong chi phí phát điện của các nhà máy điện chạy bằng nhiên liệu hóa thạch đã dẫn đến sự thay đổi ở thứ tự ưu tiên và làm tăng giá cận biên lên gần gấp đôi. Việc này giúp bù đắp cho bất cứ mức suy giảm nhu cầu về năng lượng hạt nhân do công suất năng lượng tái tạo gây ra, vốn tự động đẩy hạt nhân xuống trong thứ tự ưu tiên.

Mặc dù định giá carbon đã được áp dụng trong ngành điện và các lĩnh vực khác ở nhiều nơi trên thế giới, nhưng giá thường quá thấp để có thể tác động đáng kể đến quyết định đầu tư cho công suất mới. Hiện nay có khoảng 45 nước và 34 vùng pháp lý địa phương có một số hình thức cơ chế định giá carbon, áp dụng cho 21% lượng phát thải khí nhà kính. Hệ thống giao dịch phát thải CO<sub>2</sub> đã được thực hiện ở một số thị trường điện, bao gồm Liên minh Châu Âu, một nhóm các tiểu bang ở phía đông bắc Mỹ và California. Trung Quốc, có kế hoạch quốc gia được ban hành vào năm 2021, ngay lập tức trở thành thị trường carbon lớn nhất thế

giới (tính theo khối lượng) bao gồm hơn 4 Gt lượng khí thải CO<sub>2</sub>. Cho đến gần đây, giá carbon ở hầu hết các hệ thống này đều ở mức thấp, chỉ có tác động nhỏ đến giá điện bán buôn. Tình trạng này đã thay đổi gần đây, với mức tăng đáng kể diễn ra ở Châu Âu, nơi giá tăng lên khoảng 100 EUR/tấn vào đầu năm 2022, mặc dù mức giá này đã giảm mạnh lại sau khi xảy ra giao tranh giữa Nga và Ukraine; các giấy phép trước đây chưa bao giờ được giao dịch liên tục trên 30 EUR/tấn. Giá cũng đã tăng ở Mỹ, mặc dù vẫn còn trì trệ ở Trung Quốc.

Cơ chế định giá carbon chỉ được thực hiện một vài nơi trên nước Mỹ. Do việc mở rộng công suất năng lượng tái tạo và đình trệ nhu cầu điện năng, nên các nhà máy điện hạt nhân đang phải chịu áp lực tài chính ngày càng tăng ở một số bang. Kể từ năm 2013, có tới 12 nhà máy hạt nhân đã phải đóng cửa vì lý do tài chính còn một số khác vẫn có nguy cơ bị đóng cửa. Một số bang đã áp dụng tín dụng phát thải bằng không như một biện pháp tạm thời để cứu trợ tài chính và hỗ trợ hoạt động liên tục của các lò phản ứng hạt nhân. Các khoản tín dụng này hoạt động theo cách tương tự như nghĩa vụ tái tạo, vốn được sử dụng ở một số tiểu bang khác, mang lại nguồn doanh thu bổ sung cho các công nghệ phát thải thấp. Gần đây hơn, với tư cách là một phần của Luật Cơ sở hạ tầng Lưỡng đảng năm 2021, Chương trình Tín dụng Hạt nhân Dân sự trị giá 6 tỷ USD được đưa ra để giúp duy trì các nhà máy điện hạt nhân. Theo chương trình, chủ sở hữu hoặc người vận hành các lò phản ứng thương mại có thể nộp đơn xin chứng nhận và đấu thầu cạnh tranh cho tín dụng để hỗ trợ hoạt động liên tục của họ.

## **II. NĂNG LƯỢNG HẠT NHÂN TRONG LỘ TRÌNH HƯỚNG TỚI PHÁT THẢI “NET ZERO”**

### **2.1. Đóng góp của điện hạt nhân hướng tới phát thải “net zero”**

Năm 2015, cộng đồng quốc tế đã thông qua Hiệp định Paris về biến đổi khí hậu, cam kết giữ mức tăng nhiệt độ trung bình toàn cầu thấp hơn 2°C so với mức tiền công nghiệp, và nếu có thể thì giới hạn ở mức 1,5°C. Điều này đòi hỏi những nỗ lực đầy tham vọng và cấp bách để giảm thiểu phát thải khí nhà kính (GHG) trong tất cả các hoạt động và các lĩnh vực, bao gồm cả việc chuyển đổi hoàn toàn ngành năng lượng để loại bỏ sản xuất và sử dụng nhiên liệu hóa thạch vốn là nguồn chính tạo ra cCO<sub>2</sub>, khí nhà kính chính. Việc này đòi hỏi ngành năng lượng phải trở nên trung tính carbon, với bất kỳ lượng phát thải CO<sub>2</sub> nào cũng được bù đắp bằng các cách loại bỏ CO<sub>2</sub> - tức là đạt được lượng phát thải ‘ròng bằng 0’ - vào khoảng giữa thế kỷ. Mặc dù có nhiều cách khả thi để thực hiện mục tiêu này, nhưng các kịch bản khí hậu và năng lượng dài hạn, chẳng hạn như những kịch bản được nêu trong *Báo cáo đặc biệt về hiện tượng nóng lên toàn cầu 1,5°C* của Ủy ban liên chính phủ về biến đổi khí hậu (IPCC) và *Lộ trình không phát thải đến năm 2050* của Mạng lưới của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA), đã xác định hai yếu tố then chốt là: điện khí hóa rộng rãi nền kinh tế bằng điện carbon thấp (từ năng lượng tái tạo và hạt nhân), và triển khai các nguồn mang năng lượng carbon thấp khác (nhiệt, hydro, nhiên liệu tổng hợp, và những nguồn khác) trong các ứng dụng ít phù hợp hơn với điện khí hóa, bao gồm cả những lĩnh vực 'khó giảm bớt' trong công nghiệp và giao thông vận tải.

Trong bối cảnh đó, năng lượng hạt nhân đang dần được công nhận không chỉ là một phương án năng lượng thân thiện với khí hậu mà còn là một yếu tố tạo điều kiện để chuyển đổi lĩnh vực năng lượng. Điều này bắt nguồn từ những thuộc tính riêng của năng lượng hạt nhân gồm: có phát thải khí nhà kính thấp nhất, khả dụng 24/7, vận hành linh hoạt, chiếm ít đất và tính linh hoạt để khử carbon những hoạt động khó giảm bớt. Tuy nhiên, mặc dù đánh giá khoa học trung lập từ IPCC, IEA và những tổ chức khác công nhận tiềm năng quan trọng của năng lượng hạt nhân trong việc góp phần giảm thiểu biến đổi khí hậu và những thách thức toàn cầu khác, mức độ mà thế giới sẽ tận dụng nguồn năng lượng bền vững, đáng tin cậy và có lượng khí thải thấp này vẫn còn rất bấp bênh, phần nào do mức độ chấp nhận của công chúng và ủng hộ chính sách rất hạn chế và ngày càng giảm đi. Từ năm 2011 đến 2020 công suất phát điện hạt nhân toàn cầu tăng rất khiêm tốn, với tổng bổ sung là 59 GW. Trong khi các chương trình ở một số quốc gia cho phép tiếp tục vận hành các nhà máy điện hạt nhân hiện có, ở một số nơi kéo dài lên tới 80 năm, thì cũng chính thời gian này có tới 48 GW bị mất đi do lò phản ứng ngừng hoạt động.

Do các nước trên thế giới ngày càng tham vọng về khí hậu và đẩy nhanh các kế hoạch khử carbon của họ, thập kỷ tiếp theo và xa hơn sẽ mang lại triển vọng tăng cường triển khai điện hạt nhân, được phản ánh trong kế hoạch của một số quốc gia. Lộ trình Phát thải ròng bằng 0 đến năm 2050 của IEA cũng đưa ra dự đoán phát điện hạt nhân sẽ cần tăng gấp đôi từ năm 2020 đến năm 2050 nếu thế giới muốn đáp ứng tham vọng phát thải ròng bằng 0, lưu ý rằng “ở mức đỉnh vào đầu những năm 2030, công suất điện hạt nhân bổ sung toàn cầu đạt 30 GW mỗi năm, gấp 5 lần tốc độ thập kỷ trước đây”<sup>11</sup>. Những con số này rất phù hợp với trường hợp dự báo cao là khoảng 550 GW công suất mới vào năm 2050 của Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế (IAEA), dự báo này dựa trên đánh giá 'từ dưới lên' từng quốc gia một cách chi tiết.

#### Cần hành động khẩn cấp

Thời gian không còn nhiều để hạn chế lượng khí thải toàn cầu và tránh những tác động lớn từ biến đổi khí hậu. Tình trạng cấp thiết này đòi hỏi phải triển khai tất cả các phương án carbon

#### **Hộp 4. Xây dựng hệ thống giáo dục về quá trình chuyển đổi carbon thấp ở Các Tiểu vương quốc Ả rập Thống nhất**

Năm 2020, Các Tiểu vương quốc Ả rập Thống nhất bắt đầu kết nối nhà máy điện hạt nhân đầu tiên - Barakah - vào lưới điện. Nhà máy sẽ cung cấp tới 25% lượng điện của quốc gia và giảm 21 triệu tấn khí thải CO<sub>2</sub> hàng năm (khoảng 6-7% lượng phát thải dự kiến vào năm 2030).

Giống 30 nước hiện đang thực hiện hoặc xem xét các chương trình điện hạt nhân, UAE đã tiến hành một loạt hành động có hệ thống để phát triển cơ sở hạ tầng hỗ trợ về con người, vật chất và thể chế. UAE đặc biệt chú ý xây dựng hệ thống giáo dục kỹ thuật và dạy nghề để đào tạo lực lượng lao động có trình độ chuyên môn cao cho điện hạt nhân và các công nghệ năng lượng sạch khác nhằm hỗ trợ tối đa các ưu tiên quốc gia cho phát triển bền vững, đa dạng hóa kinh tế, năng lượng tin cậy và giảm thiểu biến đổi khí hậu. Việc này đã nâng cao hạ tầng giáo dục cung cấp nền tảng cho sự phát triển kinh tế và xã hội rộng hơn.

*Nguồn: Second Nationally Determined Contribution of the United Arab Emirates, Abu Dhabi, 2020*

<sup>11</sup> IEA, Net Zero in 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, Paris, 2021

thấp để chuyển khối nhiên liệu hóa thạch, đặc biệt là các phương án đã được chứng minh, có chi phí hiệu quả và hỗ trợ phát triển rộng hơn và có các mục tiêu môi trường. Nhà máy điện hạt nhân hiện hoạt động tại 32 quốc gia đang giảm lượng phát thải CO<sub>2</sub> của ngành điện toàn cầu khoảng 10%<sup>12</sup> và 19 quốc gia hiện đang xây dựng thêm khoảng 50 lò phản ứng điện có công suất khoảng 54 GW. Bangladesh và Thổ Nhĩ Kỳ đang xây dựng lò phản ứng đầu tiên còn Belarus và các tiểu Vương quốc Ả Rập Thống Nhất bắt đầu sản xuất điện hạt nhân vào năm 2020: có thêm nhiều quốc gia nhận ra vai trò của điện hạt nhân trong cả biến đổi khí hậu lẫn phát triển kinh tế dài hạn và khoảng 30 nước đang hợp tác với IAEA để khám phá sử dụng năng lượng hạt nhân lần đầu tiên. Tuy vậy, tốc độ xây dựng lò phản ứng hiện nay vẫn chậm hơn nhiều so với mức cần để đạt được một thế giới không phát thải CO<sub>2</sub>. Trong khi ngành công nghiệp hạt nhân đang nỗ lực kiểm soát chi phí xây dựng mới thông qua các dây chuyền cung cấp hợp lý và xây dựng mô-đun, thì việc đẩy nhanh triển khai các dự án mới cũng sẽ đòi hỏi một khung chính sách thuận lợi hơn để làm tăng niềm tin của nhà đầu tư và giảm chi phí tài chính ở hầu hết các nước.

Một thách thức cấp bách khác là sự lão hóa của các lò phản ứng hạt nhân. Hơn hai phần ba công suất vận hành điện hạt nhân, chiếm khoảng 18% sản lượng điện carbon thấp trên thế giới, đã trên 30 tuổi và đang phải đối mặt với một tương lai không chắc chắn, đặc biệt là ở châu Âu, Nhật Bản và Mỹ. Tránh sụt giảm đột ngột lượng điện carbon thấp do các nhà máy điện hạt nhân này ngừng hoạt động sẽ đòi hỏi những nỗ lực liên tục để kéo dài tuổi thọ của chúng, thông qua đầu tư và hiện đại hóa nhà máy. Về mặt tích cực, khoảng 100 lò phản ứng điện hạt nhân đã nhận được giấy phép mở rộng vòng đời trong các khoảng thời gian khác nhau sau khi tân trang lại. Tuy nhiên, trong khi điện được sản xuất từ những nhà máy cũ hơn này, các lò phản ứng được khấu hao hoàn toàn là một trong những nguồn điện carbon thấp rẻ nhất, thì năng lực cạnh tranh của các nhà máy này có thể bị thách thức bằng các nguồn nhiên liệu hóa thạch rẻ hơn hoặc năng lượng tái tạo được trợ cấp. Thách thức này có thể giải quyết phần nào bằng các biện pháp định giá và trả tiền cho sự đóng góp của các nhà máy hiện có vào việc tạo ra lượng carbon thấp, chẳng hạn như thông qua tín dụng thuế sản xuất, từ đó hỗ trợ kéo dài tuổi thọ của nhà máy điện.

Năng lượng hạt nhân không chỉ cung cấp điện mà còn là chìa khóa mở ra cơ hội đạt được mục tiêu “net zero”

Sản xuất và sử dụng năng lượng là nguyên nhân tạo ra khoảng 3/4 lượng khí thải CO<sub>2</sub> toàn cầu, trong số đó các nhà máy điện và nhiệt chiếm tới 40%. Hơn nữa, nhu cầu điện toàn cầu sẽ tăng lên trong những thập kỷ tới. Do đó, chuyển đổi từ nhiên liệu hóa thạch sang phát điện carbon thấp là chìa khóa để cắt giảm một tỷ lệ đáng kể lượng khí thải và giảm thiểu biến đổi khí hậu. Tuy nhiên, sản xuất điện không carbon thông qua việc sử dụng nhiều hơn năng lượng

---

<sup>12</sup> IEA, Net Zero in 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, Paris, 2021

hạt nhân, thủy điện, gió và năng lượng mặt trời chỉ là bước đầu tiên, còn phát thải liên quan đến năng lượng - chủ yếu từ sản sinh nhiệt trực tiếp trong công nghiệp và xây dựng, giao thông vận tải - cũng cần phải được giảm bớt, bằng cách điện khí hóa (giả sử công nghệ carbon thấp được sử dụng để tạo ra điện) hoặc bằng cách thay thế nhiên liệu hóa thạch bằng các nhiên liệu khác, bao gồm cả các nguồn nhiệt sạch và các nguồn mang năng lượng thay thế như hydro và các nhiên liệu tổng hợp khác.

Năng lượng hạt nhân rất phù hợp để khử carbon trong cả sản xuất điện và nhiệt, và nó cũng có thể sản xuất hydro carbon thấp với quy mô lớn và với chi phí ngày càng cạnh tranh. Ngoài hydro, điện hạt nhân cung cấp nhiệt để sưởi ấm khu vực còn các lò phản ứng đổi mới đang được phát triển dự kiến sẽ có thể cung cấp nhiệt với nhiệt độ cao cần cho nhiều ngành công nghiệp. Mặc dù rất quan trọng để đạt tới “net zero”, tiềm năng của năng lượng hạt nhân đối với những ứng dụng phi điện chưa được phản ánh trong chính sách và các quyết định đầu tư, khiến cho có nguy cơ trì hoãn phát triển và triển khai các phương án carbon thấp này. Giải quyết những rào cản tiềm tàng này, chẳng hạn như thông qua quan hệ đối tác công-tư để thúc đẩy phát triển và thương mại hóa công nghệ, sẽ rất quan trọng để đạt được “net zero” vào năm 2050 như được IEA nhấn mạnh. Gần một nửa mức giảm lượng khí thải dự kiến sẽ dựa vào các công nghệ chưa tới thị trường, bao gồm cả hệ thống năng lượng hạt nhân tiên tiến.

Ngoài đáp ứng nhu cầu hành động cấp thiết bảo vệ khí hậu, bằng cách cung cấp điện, nhiệt và hydro carbon thấp đáng tin cậy, năng lượng hạt nhân cũng rất phù hợp để đẩy mạnh phát triển các hướng kinh tế mới trong cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư. Các công nghệ mới, bao gồm cả những thiết kế hạt nhân tiên tiến, được kỳ vọng sẽ cho phép các nền kinh tế mới nổi và đang phát triển vượt mặt (hoặc “nhảy vọt bỏ qua”) các mô hình phát triển lịch sử truyền thống được xây dựng vào nhiên liệu hóa thạch và công nghiệp thâm dụng năng lượng, và thay vào đó đưa các công nghệ năng lượng carbon thấp - bao gồm cả năng lượng tái tạo và hạt nhân - thành trọng tâm của phát triển kinh tế. Tuy nhiên, ngày càng có bằng chứng cho thấy điện khí hóa chỉ thông qua năng lượng tái tạo, đặc biệt là các công nghệ năng lượng mặt trời ngoại lưới, là không đủ để phát huy đầy đủ tiềm năng tăng trưởng kinh tế. Ví dụ, mặc dù mở rộng khả năng tiếp cận điện bằng các nguồn năng lượng tái tạo ở nông thôn châu Phi mang lại hiệu quả tích cực cho phúc lợi cá nhân, nhưng nó lại có tác dụng hạn chế tới phát triển kinh tế và quan hệ đối tác với các công nghệ đáng tin cậy, phát thải thấp khác, vốn có thể góp phần tăng quy mô sản xuất năng lượng để nhanh chóng giúp hàng triệu người dân thoát nghèo và cung cấp năng lượng cho các siêu đô thị trong tương lai.

## ***2.2. Vai trò của điện hạt nhân trong lộ trình chuyển đổi năng lượng***

Hành trình đạt tới mức phát thải ròng bằng không có năm đặc điểm, phổ biến đối với hầu hết tất cả kịch bản đáp ứng các mục tiêu về khí hậu, mở ra cơ hội cho năng lượng hạt nhân:

- Điện khí hóa rộng rãi các mục đích sử dụng cuối cùng, với tiêu dùng cuối cùng luôn có mức tiêu thụ điện ngày càng cao.
- Sản xuất điện phát thải thấp tăng trưởng nhanh chóng.

- Cần phải hạn chế khí thải từ sản xuất nhiệt.
- Nhu cầu về hydro phát thải thấp ngày càng tăng nhanh.
- Nhu cầu tiếp tục hỗ trợ đổi mới sáng tạo, tạo điều kiện phát triển công nghệ hạt nhân tiên tiến.

Tìm hiểu sự đóng góp của năng lượng hạt nhân trong 5 đặc điểm này có tham khảo tới kịch bản phát thải ròng bằng không vào năm 2050 (NZE) của IEA, sẽ cho thấy cần những gì để ngành năng lượng toàn cầu đạt được mức phát thải CO<sub>2</sub> ròng bằng 0 vào năm 2050. Cùng với giảm lượng phát thải khí nhà kính tương ứng từ ngoài ngành năng lượng, việc này phù hợp với hạn chế tăng nhiệt độ toàn cầu lên 1,5°C vào năm 2100 mà không vượt ngưỡng nhiệt (với xác suất 50%).

#### *Điện khí hóa là trụ cột chính của quá trình khử carbon*

Sử dụng điện thay cho nhiên liệu hóa thạch giúp cắt giảm khoảng 7 Gt phát thải CO<sub>2</sub> của ngành năng lượng toàn cầu trong kịch bản NZE vào năm 2050, chiếm 20% tổng mức giảm. Nhu cầu điện toàn cầu tăng từ khoảng 23.000 TWh vào năm 2020 lên hơn 60.000 TWh vào năm 2050, với tỷ trọng điện trong tổng tiêu thụ cuối tăng từ 20% lên gần 50%. Sản xuất hydro thương mại là động lực hàng đầu cho mức tăng nhu cầu điện toàn cầu, thêm hơn 12.000 TWh – một lượng lớn hơn tổng nhu cầu điện ở các nền kinh tế tiên tiến hiện nay. Trong số các lĩnh vực sử dụng cuối, ngành công nghiệp có mức tiêu thụ điện tăng lớn nhất gần như 11.000 TWh, chủ yếu dùng cho các ứng dụng ở nhiệt độ thấp và trung bình, cơ bản dùng trong ngành công nghiệp nhẹ. Mức tăng trưởng nhanh chóng của số lượng ô tô, xe buýt và xe tải điện làm tăng sử dụng điện trong giao thông toàn cầu lên hơn 9.000 TWh. Phần tăng còn lại đến từ điện khí hóa các lĩnh vực sử dụng cuối khác, bao gồm sưởi ấm trong các tòa nhà và đun nấu.

Các nền kinh tế thị trường mới nổi và đang phát triển (EMDE) chiếm ¾ mức tăng nhu cầu điện toàn cầu trong kịch bản NZE, do tốc độ tăng trưởng dân số, thu nhập và mức sống của họ phát triển hơn. Sự phụ thuộc vào điện ngày càng cao để đáp ứng mức gia tăng nhu cầu về các dịch vụ năng lượng khiến tăng trưởng nhu cầu điện tăng từ bình quân 3,7%/năm giai đoạn 2016-2020 lên 3,9% giai đoạn 2021-2050. Nhu cầu điện ở các nền kinh tế tiên tiến tăng trở lại sau khi đã chững lại trong mấy năm gần đây, do quá trình điện khí hóa các mục đích sử dụng cuối cùng nhanh hơn và sự bùng nổ sản xuất hydro điện phân.

#### *Sản xuất điện phát thải thấp tăng trưởng nhanh chóng*

Gia tăng sản xuất điện phát thải thấp trong kịch bản NZE, vừa để đáp ứng nhu cầu điện tăng lên và vừa thay thế nhiên liệu hóa thạch, là xu hướng tất yếu. Năm 2021, nhiên liệu hóa thạch chiếm hơn 60% sản xuất điện trên toàn thế giới, dẫn đầu là than (35%), khí tự nhiên (23%) và dầu (3%). Thủy điện là nguồn phát điện phát thải thấp lớn nhất (16% sản lượng), tiếp theo là điện hạt nhân (10%), gió (7%) và năng lượng mặt trời (4%). Ngành điện phát thải 13,8 Gt vào năm 2021, cao hơn bất kỳ ngành nào và gần 40% tổng phát thải liên quan đến năng lượng. Bức tranh này sẽ thay đổi hoàn toàn trong ba thập kỷ tới năm 2050 trong kịch bản NZE.

Sản lượng điện toàn cầu sẽ tăng gấp 2,5 lần giai đoạn 2020-2050 để theo kịp nhu cầu. Ngành điện sẽ là ngành đầu tiên đạt được mức phát thải ròng bằng 0, hoàn thành mục tiêu này tới năm 2035 ở các nền kinh tế tiên tiến và đến năm 2040 trên toàn thế giới. Các nguồn phát thải thấp tăng gấp bảy lần tới 2050, tốc độ tăng trưởng bình quân khoảng 2.000 TWh, hay 7% mỗi năm, tương đương với bổ sung thêm hơn 1.400 GW công suất điện mặt trời, 750 GW năng lượng gió hay 280 GW năng lượng hạt nhân mỗi năm.

Đầu tư toàn cầu vào các nguồn điện phát thải thấp tăng mạnh trong thập kỷ hiện tại, đạt bình quân trên 1,1 nghìn tỷ USD mỗi năm trong giai đoạn 2021-2030 - gần gấp bốn lần giai đoạn 2011-2020. Nỗ lực thay thế hoàn toàn nhiên liệu hóa thạch trong sản xuất điện tới năm 2040 sẽ đẩy mạnh tốc độ đầu tư thậm chí còn cao hơn vào những năm 2030, báo hiệu một cơ hội rất lớn cho tất cả các nguồn điện phát thải thấp thương mại hóa khả dụng và chi phí cạnh tranh. Sau năm 2040, đầu tư vào điện sạch sẽ giảm trở lại, với các nguồn mới chỉ để đáp ứng tăng trưởng nhu cầu điện.

### *Hạn chế phát thải từ sản xuất nhiệt*

Giảm lượng khí thải từ sản xuất nhiệt thương mại, được truyền tới các mạng lưới nhiệt khu vực hoặc bán cho ngành công nghiệp, là nhiệm vụ chính để đạt được phát thải ròng bằng 0. Năm 2021, gần 90% lượng nhiệt được bán thương mại trên toàn thế giới được cấp bởi nhiên liệu hóa thạch và 75% từ các cơ sở nhiệt và điện kết hợp (CHP). Than đá là nguồn cấp nhiệt lớn nhất, chiếm 45% tổng lượng, tiếp theo là khí đốt tự nhiên (41%) và năng lượng sinh học (8%). Năng lượng hạt nhân chỉ cung cấp 0,1%. Sản xuất nhiệt toàn cầu thải ra 1,3 Gt CO<sub>2</sub> trong năm 2021, hay 4% tổng lượng phát thải của ngành năng lượng.

Khí thải toàn cầu từ sản xuất nhiệt gần như được loại bỏ hoàn toàn trong kịch bản NZE nhờ kết hợp giữa nhu cầu thấp hơn do tăng hiệu suất và điện khí hóa ở các tòa nhà và ngành công nghiệp, đồng thời chuyển sang sử dụng các nguồn năng lượng phát thải thấp. Nhu cầu nhiệt thương mại giảm đều đặn, khoảng 15% vào năm 2030 và gần 60% tới năm 2050 so với năm 2020. Các nguồn phát thải thấp sẽ tăng lên gần 40% tổng nguồn cung cấp nhiệt vào năm 2030 và gần 100% vào năm 2040. Từ năm 2020 đến 2040, cung cấp nhiệt phát thải thấp tăng khoảng 400 petajun (PJ= 1 x 10<sup>15</sup>J) mỗi năm, tương đương với việc bổ sung thêm 25 GW năng lượng nhiệt (GWth) công suất CHP năng lượng sinh học mới, 20 GWth CHP hạt nhân hoặc 18 bơm nhiệt quy mô lớn hàng năm. Bổ sung công suất dựa trên các nguồn phát thải thấp giảm mạnh trở lại do chúng chỉ cần thay thế công suất không hoạt động.

Đầu tư vào các nhà máy nhiệt phát thải thấp tăng nhanh đến năm 2040 theo kịch bản NZE, trung bình hơn 30 tỷ USD mỗi năm trong những năm 2020 và khoảng 27 tỷ USD trong những năm 2030 trước khi giảm mạnh trở lại. Giống như điện phát thải thấp, những công nghệ đã khả dụng về mặt thương mại và có chi phí cạnh tranh chiếm phần lớn khoản đầu tư này.

### *Nhu cầu về hydro phát thải thấp ngày càng tăng nhanh*



Hydro, với vai trò là chất mang năng lượng ví như điện, được kỳ vọng sẽ đóng một vai trò quan trọng để tạo điều kiện thuận lợi cho việc giảm phát thải trong tất cả các lĩnh vực sử dụng cuối cùng. Năm 2020, sản xuất hydro toàn cầu đạt khoảng 90 Mt<sup>13</sup>, phần lớn được sản xuất từ nhiên liệu hóa thạch và được sử dụng trong các ứng dụng lọc dầu hoặc công nghiệp. Hydro phát thải thấp chiếm khoảng 10% tổng số, được sản xuất gần như hoàn toàn bằng nhiên liệu hóa thạch có CCUS (hydro được sản xuất thông qua điện phân sử dụng điện dựa trên năng lượng tái tạo vẫn ở mức tối thiểu). Sản xuất hydro toàn cầu thải ra gần 0,9 Gt khí thải CO<sub>2</sub>, chiếm 2% tổng lượng phát thải của ngành năng lượng.

Sản xuất hydro toàn cầu phát triển nhanh chóng trong kịch bản NZE, tăng hơn gấp đôi lên 200 Mt vào năm 2030 và hơn 500 Mt vào năm 2050. Tất cả mức tăng này đều đến từ các công nghệ sản xuất phát thải thấp, với sản lượng dựa trên nhiên liệu hóa thạch giảm đều do các nhà máy hiện tại sẽ dừng hoạt động ở mức chỉ còn 25% tổng sản lượng hydro vào năm 2030 và dưới 10% vào năm 2040. Nhiên liệu hóa thạch có CCUS trở thành nguồn cấp hydro hàng đầu vào năm 2030 nhưng sẽ nhanh chóng bị điện phân vượt qua. Với 350 dự án hiện đang được phát triển, sản xuất hydro điện phân sắp tăng mạnh, mặc dù tốc độ dài hạn của việc mở rộng phụ thuộc vào các chiến lược và chính sách hydro hiệu quả. Đầu tư toàn cầu vào sản xuất hydro carbon thấp tăng trưởng nhanh chóng ở kịch bản NZE trong trung hạn, trung bình trên 80 tỷ USD mỗi năm trong những năm thập niên 2020 và 2030, trước khi giảm trở lại mức những năm 2040 khi lượng phát thải ròng bằng không xuất hiện.

### *Hỗ trợ đổi mới sáng tạo*

Toàn bộ một nửa lượng giảm phát thải trong kịch bản NZE vào năm 2050 so với năm 2020 là liên quan đến các công nghệ chưa có trên thị trường, mặc dù nhiều công nghệ hiện đã ở giai đoạn thử nghiệm hoặc nguyên mẫu. Giao thông vận tải đường dài và công nghiệp nặng rất cần đổi mới sáng tạo, đây là những ngành mà giảm phát thải bằng các công nghệ hiện tại là cực kỳ khó khăn và tốn kém. Các lĩnh vực chính bao gồm thiết kế ắc quy tiên tiến, thu hồi carbon trong ngành công nghiệp xi măng, các công nghệ loại bỏ carbon và máy điện phân quy mô lớn để sản xuất hydro, cũng như các thiết kế hạt nhân tiên tiến như lò phản ứng mô-đun nhỏ (SMR), nhiên liệu sinh học tiên tiến, bơm nhiệt được tối ưu hóa với hệ thống lưu trữ và xe tải tự hành. Thúc đẩy đổi mới sáng tạo sẽ cần phải chi tiêu nhiều hơn cho nghiên cứu và phát triển (R&D) năng lượng sạch và tăng cường cộng tác và hợp tác quốc tế.

### **III. Lò phản ứng mô-đun nhỏ (SMR)**

Được mô tả trong kịch bản NZE, việc tăng gấp đôi công suất điện hạt nhân tới giữa thế kỷ rõ ràng là một nhiệm vụ to lớn, đòi hỏi một khoản đầu tư lên tới 2,6 nghìn tỷ USD trong giai đoạn 2021-2050. Phần lớn số vốn này sẽ cần được các chính phủ hỗ trợ với vai trò là những rủi ro đầu tư liên quan đến các dự án điện hạt nhân.

---

<sup>13</sup> Megaton (megatone) = 1000 kiloton

Các lò phản ứng tiên tiến có kích thước nhỏ hơn, giá cả phải chăng hơn, dễ xây dựng và vận hành, và do đó dễ quản lý và cấp tài chính hơn là một giải pháp thay thế hoặc bổ sung cho các lò phản ứng quy mô lớn. Loại lò phản ứng này được gọi là lò phản ứng mô-đun nhỏ (SMR) rất có tiềm năng.

SMR thường được định nghĩa là lò phản ứng hạt nhân có công suất điện nhỏ hơn 300 MW mỗi mô-đun, mặc dù một số mô hình đang được phát triển có thể lớn hơn. Chúng bao gồm cả các lò phản ứng vi mô-đun có công suất nhỏ hơn 10 MW. Hiện có rất nhiều dạng thiết kế được phát triển trên khắp thế giới, trong đó có khoảng 70 thiết kế SMR, gồm các công nghệ cơ bản khác nhau, bao gồm lò phản ứng làm mát bằng nước, khí đốt, kim loại lỏng hoặc lò phản ứng làm mát bằng muối nóng chảy, cũng như các chu trình nhiên liệu khác nhau. Chúng khác nhau rõ rệt theo mức độ công nghệ và mức độ sẵn sàng cấp phép của chúng. Tuy nhiên, hiện vẫn chưa có loại nào ở giai đoạn thương mại hóa hoàn toàn.

SMR đang được phát triển cho tất cả các loại lò phản ứng chính: lò phản ứng làm mát bằng nước nhẹ (Light Water Reactor-LWR), lò phản ứng làm mát bằng khí nhiệt độ cao (High Temperature Gas-Cooled Reactor-HTGR), lò phản ứng làm mát bằng kim loại lỏng, natri và khí với phổ neutron nhanh (Fast Neutron Reactor-FNR), lò phản ứng muối nóng chảy (Molten Salt Reactor-MSR) và mới đây nhất là lò phản ứng siêu nhỏ (Micro Reactor). Loại lò LWR có rủi ro công nghệ thấp nhất; nhưng loại lò FNR có thể nhỏ hơn, đơn giản hơn và hoạt động lâu hơn trước khi phải tiếp nhiên liệu. Động lực chính để phát triển SMR là đáp ứng nhu cầu phát điện linh hoạt cho nhiều người dùng và mang tính ứng dụng hơn, bao gồm thay thế các nhà máy điện hóa thạch đã cũ, cung cấp chế độ đồng phát cho các nước đang phát triển có lưới điện nhỏ, các khu vực xa và ngoài lưới điện, và cho phép các hệ thống năng lượng hạt nhân và năng lượng tái tạo kết hợp với nhau. Cột mốc quan trọng đã đạt được trong việc triển khai công nghệ SMR đó là Nhà máy điện hạt nhân nổi Akademik Lomonosov ở Liên bang Nga với hai mô-đun lò phản ứng KLT40S đã được kết nối với lưới điện và bắt đầu vận hành thương mại vào tháng 5 năm 2020.

Vì SMR nhỏ hơn so với các thiết kế lò phản ứng hiện tại nên nhu cầu đầu tư nhỏ hơn về giá trị tuyệt đối. Chúng thường được thiết kế để được chế tạo tại nhà máy theo mô-đun và sau đó được vận chuyển đến địa điểm mà chúng sẽ được lắp đặt. Việc này làm giảm rủi ro quản lý dự án trong quá trình xây dựng, một trong những thách thức quan trọng nhất trong tài trợ cho các dự án hạt nhân lớn. Tuy nhiên, không nên đánh giá thấp một số thiết kế yêu cầu vận chuyển các lõi nhiên liệu hoàn chỉnh, các tuyến vận chuyển liên quan, các khía cạnh an ninh và bảo vệ. Một số thiết kế SMR có các thuộc tính quản lý chất thải và an toàn riêng có thể góp phần làm tăng mức độ chấp nhận của xã hội và mở ra nguồn vốn mạo hiểm tư nhân quan trọng dành cho nghiên cứu và phát triển, cũng như thí điểm và triển khai.

SMR được thiết kế để triển khai theo chuỗi, sử dụng chuỗi cung ứng toàn cầu để giảm chi phí, như trường hợp của các lĩnh vực khác như đóng tàu hoặc chế tạo máy bay. Chúng có thể được lắp đặt dưới dạng các mô-đun đơn lẻ được phân bố trên toàn bộ mạng lưới điện, có thể có

giá trị đặc biệt ở các nước hoặc khu vực có ít mạng lưới điện được phát triển, ở vùng sâu vùng xa hoặc với vai trò là những nguồn điện, nhiệt và/hoặc hydro chuyên dụng cho các thành phố và trung tâm công nghiệp. Chúng cũng có thể được triển khai thành các nhóm mô-đun trên những địa điểm đơn lẻ. SMR cũng có thể phù hợp để thay thế các nhà máy điện nhiên liệu hóa thạch, tận dụng kết nối với mạng truyền tải đã có, nước có sẵn để làm mát và một lực lượng lao động lành nghề.

### **3.1. Các đặc điểm thiết kế chính**

Các thiết kế SMR đang được phát triển sử dụng nhiều loại chất làm mát và dạng nhiên liệu với các mức độ sẵn sàng công nghệ<sup>14</sup> (TRL) và mức độ sẵn sàng cấp phép<sup>15</sup> (LRL) khác nhau. Hầu hết các khái niệm SMR có thể được nhóm thành năm loại lớn như sau:

- Loại LWR-SMR một lò phản ứng - sử dụng công nghệ và nhiên liệu LWR đã được kiểm chứng tốt để cung cấp các lò phản ứng độc lập có thể thay thế các tổ máy nhiên liệu hóa thạch nhỏ hoặc được triển khai dưới dạng phát điện phân tán.

- Loại LWR-SMR đa mô-đun - cũng sử dụng công nghệ LWR và có thể được vận hành để thay thế cho công suất tải nền cỡ trung bình hoặc trong một khuôn khổ phát điện phân tán, tùy thuộc vào công suất phát.

- Loại SMR di động/có thể vận chuyển được - hiện đang áp dụng công nghệ LWR và nhằm mục đích dễ dàng di chuyển từ vị trí này đến vị trí khác; ví dụ: lò phản ứng KLT-40S của nhà máy điện hạt nhân nổi Akademik Lomonosov, Liên bang Nga.

- SMR thế hệ thứ IV - áp dụng các công nghệ tiên tiến, không phải LWR và bao gồm nhiều khái niệm đã được Diễn đàn Quốc tế Thế hệ thứ IV<sup>16</sup> (GIF) nghiên cứu trong nhiều năm qua.

- SMR siêu nhỏ (MMR - Micro Modular Reactor) - là các thiết kế có công suất dưới 10 MWe, thường có khả năng hoạt động bán tự trị và với khả năng vận chuyển được cải thiện so với các SMR lớn hơn. MMR thường không dựa trên LWR và áp dụng nhiều phương pháp tiếp cận công nghệ khác nhau, bao gồm cả thế hệ thứ IV. MMR chủ yếu dành cho vận hành ngoài lưới điện ở các địa điểm xa xôi, nơi chúng được dự kiến sẽ cạnh tranh với các nguồn điện phổ biến.

Các khái niệm SMR dựa trên LWR là các khái niệm hoàn thiện nhất với TRL và LRL cao nhất và chúng có khả năng triển khai thương mại sớm nhất. Một số khái niệm đang được xây dựng (như CAREM ở Argentina, ACPR50S ở Trung Quốc) hoặc đang vận hành thương mại (như KLT-40S ở Liên bang Nga). Các thiết kế khác đang đạt được tiến độ cấp phép đáng kể và có thể được xây dựng như các nguyên mẫu ban đầu vào năm 2030. Những công nghệ này là các biến thể nhỏ và tiến hóa của các lò phản ứng thế hệ thứ II và thế hệ thứ III/III+ đang hoạt động trên toàn thế giới, và được hưởng lợi từ nhiều thập kỷ kinh nghiệm vận hành và quản lý.

---

<sup>14</sup> Technology Readiness Level

<sup>15</sup> Licensing Readiness Level

<sup>16</sup> Generation IV International Forum

Công nghệ thế hệ thứ IV sử dụng các chất làm mát (kim loại lỏng, muối nóng chảy hoặc khí) và các cấu hình hệ thống khác so với LWR. Mặc dù các thiết kế dựa trên thế hệ thứ IV không có cùng cấp độ kinh nghiệm vận hành và pháp quy như các thiết kế dựa trên LWR và vẫn cần nghiên cứu bổ sung trong một số lĩnh vực (như hiệu suất và khả năng của nhiên liệu và các vật liệu cấu trúc), nhưng các thiết kế này vẫn được hưởng lợi từ lịch sử R&D sâu rộng mà dựa vào đó các nhà phát triển và cơ quan pháp quy có thể học hỏi. Các thiết kế thế hệ thứ IV trưởng thành nhất là các hệ thống làm mát bằng kim loại lỏng hoặc khí với một số lò phản ứng hiện đang hoạt động hoặc đang được xây dựng. Các thiết kế này cũng có thể được sử dụng cho các ứng dụng ngoài phát điện nhờ có nhiệt độ đầu ra cao hơn và chu trình nhiên liệu hạt nhân tiên tiến.

Mặc dù có mật mát hiệu suất nhiệt đối với một số thiết kế LWR-SMR, việc giảm kích thước của công nghệ SMR so với các lò phản ứng hạt nhân lớn truyền thống mang lại một số tính năng ưu việt như sau đối với hầu hết các thiết kế:

- Thiết kế tích hợp: Vùng hoạt nhỏ hơn cho phép sử dụng các thiết kế tích hợp, kết hợp tất cả các thành phần của hệ thống cung cấp hơi hạt nhân (NSSS) vào một thùng lò duy nhất. Cấu hình này, với tổng lượng chất làm mát sơ cấp chứa bên trong thùng sơ cấp lớn hơn đáng kể so với cấu hình vòng ngoài truyền thống, làm tăng đáng kể nhiệt dung và quán tính nhiệt của hệ thống. Do đó, cấu hình như vậy sẽ dẫn đến các đặc tính an toàn vốn có được tăng cường và các hệ thống đơn giản, dễ vận hành và bảo trì hơn.

- An toàn vốn có: Công suất đầu ra thấp hơn và tỷ lệ bề mặt trên thể tích cao hơn do vùng hoạt nhỏ hơn sẽ làm tăng hiệu quả của các hệ thống an toàn thụ động cho cả các điều kiện hoạt động bình thường và không bình thường. Nhiều thiết kế dựa trên LWR có lượng nước dự trữ rất lớn để làm mát thụ động các hệ thống lò phản ứng ngay cả trong những điều kiện khắc nghiệt. Sự phụ thuộc nhiều hơn vào các hệ thống làm mát thụ động cho phép các thiết kế đơn giản hơn, dễ dàng vận hành và bảo trì.

- Lượng nhiên liệu trong vùng hoạt ít hơn: có các lợi ích tại nhà máy và ngoài nhà máy. Tại nhà máy: ít phải che chắn hơn và liều lượng phơi nhiễm bức xạ cho người lao động do đó được giảm bớt. Ngoài nhà máy: lượng nhiên liệu ít hơn hay số hạng nguồn nhỏ hơn làm giảm xác suất xảy ra tai nạn và mức độ phát tán phóng xạ tiềm năng, có thể làm giảm các yêu cầu đối với vùng lập kế hoạch khẩn cấp (EPZ - Emergency Planning Zone). Những lợi ích như vậy có nghĩa là một số SMR có thể được đặt gần nơi cần được cung cấp năng lượng hơn.

- Cải thiện mô-đun hóa và khả năng chế tạo: Trọng lượng và kích thước trực tiếp quyết định mức độ dễ dàng cho phép các thành phần khác nhau có thể được sản xuất, vận chuyển, nâng lên và lắp đặt. Kích thước nhỏ hơn của các thiết kế SMR cho phép áp dụng các phương án mô-đun hóa đầy tham vọng cũng như áp dụng các kỹ thuật sản xuất mới.

- Tăng cường tính linh hoạt: SMR có thể đạt được các chế độ theo tải tăng cường nhờ vào các tính năng thiết kế vốn có, cũng như thông qua việc tối ưu hóa sự vận hành đa mô-đun. Tính linh hoạt của SMR cũng bao gồm các khả năng triển khai (như các hạn chế về địa điểm ít

hơn) và tính đa dạng của sản phẩm đầu ra (sản xuất điện và nhiệt kết hợp).

Các SMR đang được phát triển sẽ cần phải được tích hợp với chu trình nhiên liệu hạt nhân, có nghĩa là xây dựng trên cơ sở hạ tầng hiện có, hoặc trong một số trường hợp, dựa trên các khoản đầu tư chuyên dụng vào các năng lực công nghiệp mới. Phạm vi của các khái niệm SMR đang được xem xét, và mức độ hoàn thiện công nghệ tổng thể của chúng, đã dẫn đến việc cân nhắc một số lựa chọn chu trình nhiên liệu. Cho đến nay, rất ít nhà phát triển SMR đã phát triển hoặc cung cấp thông tin đầy đủ các chiến lược của họ trong lĩnh vực này, đặc biệt là liên quan đến phần cuối (back-end) của chu trình nhiên liệu

### ***3.2. Một số thuộc tính công nghệ và tài chính làm tăng tính khả thi của SMR trong tương lai***

SMR có các thuộc tính quan trọng có thể giúp chúng thực hiện tốt vai trò trong chuyển đổi năng lượng. Một trong những thuộc tính quan trọng nhất là các tính năng an toàn nội tại của chúng. Đầu ra điện năng thấp hơn và lõi lò phản ứng nhỏ hơn sẽ làm tăng hiệu quả của các hệ thống an toàn thụ động. Nhiều loại SMR bao gồm các tính năng an toàn riêng làm loại bỏ hoàn toàn khả năng xảy ra những tai nạn nghiêm trọng. Phụ thuộc nhiều hơn vào các hệ thống làm mát thụ động cũng khiến cho các thiết kế lò phản ứng đơn giản hơn, giúp giảm chi phí. Lợi ích của hệ thống an toàn thụ động cũng có thể dẫn đến các vùng lập kế hoạch khẩn cấp bên ngoài nhỏ hơn, làm cho việc bố trí các nhà máy gần các trung tâm dân cư hoặc công nghiệp trở nên dễ dàng hơn.

SMR cũng có một số lợi ích kỹ thuật khác. Nếu được dùng để cung cấp điện cho lưới điện, ví dụ như khi thay thế các nhà máy điện than, SMR sẽ giảm nhu cầu tăng cường cho mạng lưới truyền tải, làm tăng tiềm năng kinh tế của chúng. Yếu tố này trở nên ngày càng quan trọng do nguồn phát điện phân tán tăng lên cùng với mức tăng của năng lượng mặt trời và năng lượng gió. Như với những lò phản ứng lớn, SMR có thể có các ứng dụng khác ngoài điện, gồm sản xuất nhiệt và hydro và khử muối ở nước. Do quy mô nhỏ hơn của chúng, SMR có thể rất hấp dẫn đối với các nước có mạng lưới điện nhỏ, mặc dù vẫn rất cần phải có các cơ quan quản lý mạnh và hoạt động quản lý chất thải tại chỗ. Dự kiến thời gian thi công sẽ nhanh hơn rất nhiều nhờ chế tạo tại nhà máy và sử dụng các kỹ thuật xây dựng mô-đun.

Một số thiết kế SMR tiên tiến đang được phát triển cũng liên quan đến các chiến lược đổi mới sáng tạo nhằm tái chế nhiên liệu hạt nhân đã qua sử dụng. Những chiến lược này nhằm mục đích giảm khối lượng và độc tính phóng xạ của chất thải cấp cao mà sau cùng phải được quản lý ở các kho địa chất sâu và nhu cầu khai thác uranium cho phần đầu (front-end) của chu trình nhiên liệu hạt nhân. Những thiết kế này có thể nâng cao đóng góp của năng lượng hạt nhân vào các mục tiêu bền vững lâu dài.

SMR cũng có thể được sử dụng để đáp ứng nhu cầu phát điện linh hoạt được yêu cầu bởi các hệ thống điện có tỷ lệ điện gió và mặt trời cao. SMR cũng có thể rất phù hợp để vận hành linh hoạt, như thể hiện rõ ở một số lò phản ứng quy mô lớn truyền thống ở các kịch bản năng lượng tái tạo cao, có thể cải thiện lợi nhuận do thích ứng với những mức tăng giá điện. Ngoài

ra, có thể đạt được mức linh hoạt không chỉ thông qua sản xuất điện theo tải, mà còn với đồng phát điện linh hoạt, ví dụ thông qua sản xuất hydro hoặc lưu trữ nhiệt.

Kích thước nhỏ hơn, thời gian thực hiện dự án ngắn hơn và thuộc tính địa điểm của SMR có thể khiến chúng là một lựa chọn hấp dẫn cho các nhà đầu tư tư nhân. Tổng quy mô đầu tư sẽ có mức giá hợp lý hơn, mặc dù không nhất thiết phải rẻ hơn nếu tính trên cơ sở mỗi MW. Cùng với rủi ro dự án thấp hơn là thời gian xây dựng và xây dựng nhà máy ngắn hơn, việc này có thể khuyến khích những cách thức tài trợ mới cho các nhà máy hạt nhân mới. SMR cũng mang lại lợi thế về khả năng mở rộng, cho phép các tiện ích bổ sung công suất cho lưới điện với mức vốn kém nhỏ hơn.

### 3.3. Hiện trạng nghiên cứu, phát triển và triển khai

Tính cấp bách của thách thức phát thải bằng không cùng với những lo ngại ngày càng tăng về an ninh cung cấp điện đang thúc đẩy các chính phủ xem xét và hỗ trợ các giải pháp công nghệ. Như phần trên đã nêu rõ, một nửa mức giảm lượng khí thải ở kịch bản NZE là đến từ các công nghệ như SMR, vốn chưa khả dụng về mặt thương mại.

Sự không chắc chắn về thời điểm công nghệ SMR sẵn sàng để triển khai thương mại trên quy mô lớn sẽ gây khó khăn cho dự đoán vai trò tương lai của chúng trong việc khử carbon cho hệ thống năng lượng. Ở kịch bản NZE, tất cả các nhà máy nhiên liệu hóa thạch trên thế giới sẽ cần phải được thay bằng các giải pháp thay thế phát thải thấp, bao gồm cả năng lượng hạt nhân, không muộn hơn năm 2040. Do những điểm không chắc chắn về công nghệ nên không thể dự đoán rõ ràng được phần đóng góp của SMR trong tổng điện hạt nhân ở kịch bản này. Tuy nhiên, SMR được kỳ vọng sẽ chiếm một phần ngày càng tăng trong phần công suất hạt nhân bổ sung mới sau năm 2030, với giả định rằng việc phát triển, chứng minh công nghệ và hạ giá thành liên tục đạt được tiến bộ.

SMR cũng thu hút được sự hỗ trợ về mặt chính trị và thể chế cực kỳ mạnh, với các khoản trợ cấp của chính phủ cho R&D cũng như các dự án mẫu đã tăng lên theo một mức độ lớn trong hai năm qua ở một số quốc gia và hiện đã lên tới hàng tỷ USD. Việc này giúp thu hút các khoản đầu tư tư nhân lớn, mang lại những thành phần tham gia mới và các cách tiếp cận mới để phát triển các dự án thành ngành công nghiệp hạt nhân. Ở một số quốc gia, đây có thể được coi như một cơ hội để khẳng định vai trò lãnh đạo công nghệ.

**Bảng 3. SMR đang được phát triển trên toàn thế giới với các cột mốc ngắn hạn quan trọng**

Thiết kế	Sản lượng ròng/ modul	Loại	Nhà thiết kế	Nước	Trạng thái
ARC-100	100 MW điện	Lò phản ứng nhanh làm lạnh bằng natri lỏng	ARC Clean Energy	Canada	Dự án mẫu dự kiến ở New Brunswick
CAREM	25 MW điện	Lò phản ứng nước áp lực	CNEA	Argentina	Đang xây dựng (Zárate)
BWRX-300	300 MW điện	Lò phản ứng nước sôi	GE-Hitachi	Mỹ/Canada	Triển khai thương mại đầu tiên được công bố

					với Ontario Power Generation (Darlington, Canada) và đang trong quá trình thảo luận với Tennessee Valley Authority (Clinch River, Mỹ)
eVinci	5 MW điện và lên tới 13 MW nhiệt	Ống dẫn nhiệt	Westinghouse	Mỹ/Canada	Nộp đơn tiền cấp phép tại Mỹ vào năm 2021
Kairos Power FHR	140 MW điện	Lò phản ứng muối nóng chảy	Kairos Power	Mỹ	Đang được cấp phép với dự án mẫu dự kiến với Phòng thí nghiệm quốc gia Oakridge
Dự án Lò phản ứng Modun Micro	15 MW nhiệt	Lò phản ứng khí lạnh nhiệt cao	Global Fris Power/ Tập đoàn Ultra Safe Nuclear	Canada	Đang được cấp phép với dự án mẫu dự kiến tại Khu vực của phòng thí nghiệm Quốc gia Canada (Chalk River)
Lò phản ứng Muối ổn định – Lò đốt rác	300 MW điện	Lò phản ứng muối nóng chảy	Moltex	Canada	Dự án mẫu dự kiến ở Brunswick
NuScale SMR	50 MW điện (x12)	Lò phản ứng nước áp suất	NuScale Power	Mỹ	Đang xin cấp phép với dự án mẫu với Phòng thí nghiệm Quốc gia Idaho và Hệ thống Điện Đô thị Liên kết Utah
Natrium	345 MW điện	Lò phản ứng nhanh làm mát bằng Natri lỏng	TerraPower/GE-Hitachi	Mỹ	Dự án mẫu với khu vực được ưu tiên được xác định ở Kemmerer (Wyoming)
NUWARD	170 MW điện (x2)	Lò phản ứng nước áp suất	Tập đoàn do EDF lãnh đạo	Pháp	Dự án mẫu dự kiến tới năm 2030
RITM-200	55 MW điện	Lò phản ứng nước áp suất	OKBM Afrikantov	Nga	Phiên bản trên mặt đất đầu tiên dự kiến vào năm 2028 ở Yakutia
UK SMR	470 MW điện	Lò phản ứng nước áp suất	Tập đoàn do Rolls-Royce lãnh đạo	Vương quốc Anh	Đang xin cấp phép với Wylfa và Trawsfynydd được xác định là hai khu vực tiềm năng trong đơn cấp phép
Xe-100	80 MW điện (x4)	Lò phản ứng làm lạnh bằng khí nhiệt độ cao	X-energy	Mỹ	Dự án thí điểm với Energy Northwest (Washington)

**Tại Mỹ**, một số sáng kiến lớn gần đây liên quan đến hỗ trợ của chính quyền liên bang đã góp phần thúc đẩy SMR, bất chấp bối cảnh thị trường chung không thuận lợi cho điện hạt nhân

ở một số bang. Một số địa điểm được chọn cho các dự án mẫu liên quan đến các thiết kế lò phản ứng khác nhau, mặc dù việc xây dựng vẫn chưa được bắt đầu vì các thỏa thuận tài chính vẫn chưa được hoàn thành. Hai dự án - Kairos Power FHR và NuScale SMR - cho đến nay đã đạt tới giai đoạn xin cấp phép.

Đạo luật Việc làm và Đầu tư Cơ sở hạ tầng liên bang năm 2021 gồm nhiều điều khoản liên quan đến năng lượng hạt nhân, bao gồm tài trợ cho Chương trình thí điểm lò phản ứng tiên tiến của Bộ Năng lượng Mỹ, nhằm thúc đẩy thí điểm các lò phản ứng tiên tiến thông qua quan hệ đối tác chia sẻ chi phí với ngành công nghiệp Mỹ. Theo chương trình này, Bộ Năng lượng lựa chọn hai thiết kế lò phản ứng sẽ được đưa vào hoạt động hoàn toàn trong vòng bảy năm tới và được trao 160 triệu USD tài trợ ban đầu để thử nghiệm, cấp phép và xây dựng các nguyên mẫu: Nhà máy Natrium 345 MWe của TerraPower và tổ máy đá cuội 80 MWe của X-energy. Bộ Năng lượng sẽ đầu tư tổng cộng 3,2 tỷ USD trong 7 năm, tùy vào mức có sẵn của các khoản phân bổ trong tương lai, với việc các đối tác trong ngành cung cấp nguồn vốn phù hợp. Thông qua Văn phòng Thí điểm Năng lượng Sạch, cơ quan này đã cấp 2,5 tỷ USD tài trợ cho Chương trình thí điểm lò phản ứng tiên tiến.

**Canada** dẫn đầu trong việc phát triển SMR. Năm 2018, nước này đã phát triển một Lộ trình SMR với sự tham vấn của các bên liên quan về kinh tế và xã hội, bao gồm một số tỉnh, vùng lãnh thổ và các công ty điện lực để vạch ra vai trò của SMR trong cơ cấu năng lượng của Canada, song song với việc đưa ra các quy định giúp thu hút các khái niệm lò phản ứng nhỏ mới. Ngoài ra, Kế hoạch hành động SMR được công bố vào năm 2020, cũng như biên bản ghi nhớ cấp tỉnh được ký bởi các tỉnh Alberta, New Brunswick, Ontario và Saskatchewan hợp tác để thúc đẩy việc phát triển và triển khai SMR và khuyến khích chính phủ liên bang hỗ trợ cho các dự án mẫu SMR. Kết quả là, một số dự án như vậy hiện đang được xem xét hướng tới mục tiêu khử carbon trong các ngành khó giảm thiểu trong lĩnh vực công nghiệp, điện khí hóa các hoạt động khai thác từ xa và các ứng dụng nhiệt công nghiệp.

Lộ trình này đã xác định tiềm năng đáp ứng một loạt nhu cầu năng lượng của SMR, cùng với cơ hội xuất khẩu những công nghệ lò phản ứng hạt nhân mới này cho ngành công nghiệp hạt nhân của Canada. Nó cũng đánh giá các đặc điểm thiết kế lò phản ứng khác nhau, ví dụ như kích thước lò phản ứng hoặc nhiệt độ nhiệt, cần cho các ứng dụng cụ thể:

**Điện nồi hơi (150 MWe đến 300 MWe):** Thay thế phát điện bằng đốt than chính là một cơ hội ngắn hạn quan trọng cho SMR. Dự án đầu tiên thuộc loại này ở một địa điểm hạt nhân hiện có tại Darlington, Ontario dựa trên lò phản ứng BWRX300 được phát triển bởi GE-Hitachi – một liên doanh Mỹ-Nhật - được ủy quyền tới cuối những năm 2020. Saskatchewan cũng đang xem xét các SMR nồi hơi. Tập đoàn điện lực cấp tỉnh ở New Brunswick cũng đang theo đuổi dự án lắp đặt SMR tại địa điểm nhà máy điện hạt nhân Point Lepreau. Công nghệ Thế hệ IV - một tập hợp các thiết kế lò phản ứng hạt nhân hiện đang được nghiên cứu bởi Diễn đàn quốc tế thế hệ IV - cho phép sử dụng nhiên liệu tái chế từ đầu những năm 2030, đang được xem xét cho dự án này.



Các ngành công nghiệp nặng và khai thác (10 MWe đến 80 MWe): Phân khúc thị trường này liên quan đến SMR ngoại lưới điện dành cho khai thác mỏ, cát dầu và các ngành công nghiệp nặng khác, những lĩnh vực mà lượng khí thải khó giảm do cần nhiệt độ cao. Trong nhiều năm, các ngành công nghiệp khai thác ở Canada luôn quan tâm đến SMR nhiệt độ cao để thay thế máy phát điện diesel.

Các cộng đồng vùng sâu vùng xa (1 MWe đến 10 MWe): Các cộng đồng vùng sâu vùng xa, hiện đang dựa chủ yếu vào sử dụng các máy phát điện diesel ngoại lưới để cấp điện, được xác định là một cơ hội thị trường lâu dài cho các lò phản ứng mô-đun siêu nhỏ. Global First Power, một liên doanh giữa Ontario Power Generation và USNC Power, đã đệ trình đơn để chuẩn bị mặt bằng xây dựng một lò phản ứng mô-đun siêu nhỏ tại trung tâm Atomic Energy của Phòng thí nghiệm Chalk River. Dự án này hiện đang đang tiến hành đánh giá môi trường.

Kế hoạch hành động SMR năm 2020 đưa ra các bước triển khai SMR và dự kiến các tổ máy đầu tiên sẽ bắt đầu hoạt động vào cuối những năm 2020. Một số dự án nhận được tài trợ của chính phủ liên bang và tỉnh, bao gồm cả Lò phản ứng muối nóng chảy tích hợp đang được phát triển bởi Terrestrial Energy, SMR muối nóng chảy Moltex Energy, SMR làm mát bằng natri ARC-100 và lò phản ứng siêu nhỏ eVinci của Westinghouse.

**Trung Quốc** là nước đi đầu trong phát triển công nghệ hạt nhân tiên tiến. Một nhà máy kiểu mẫu có hai tổ máy (HTR-PM) mô-đun đệm cuối lò phản ứng làm mát bằng khí nhiệt độ cao – tổ máy đầu tiên thuộc loại này – tại Vịnh Shidao đã được hòa lưới điện vào năm 2021. China Huaneng là tổ chức lãnh đạo trong liên doanh các đơn vị xây dựng, cùng với Tổng công ty Kỹ thuật Hạt nhân Trung Quốc (một công ty con của Tổng công ty Hạt nhân Quốc gia Trung Quốc) và Viện Hạt nhân và công nghệ năng lượng mới của Đại học Thanh Hoa, là cơ quan lãnh đạo về R&D hạt nhân trên toàn quốc. Mỗi lò phản ứng điều khiển một tua bin hơi nước đơn công suất 210 MW, sử dụng khí heli làm chất làm mát chính và đạt nhiệt độ cao tới 750°C. Các dự án HTR-PM khác, tại Wan'an ở tỉnh Phúc Kiến, Sanmen ở tỉnh Chiết Giang và Bai'an ở tỉnh Quảng đông, đã được được công bố. Ngoài ra, việc xây dựng dự án mẫu SMR ACP100 ở tỉnh đảo Hải Nam đã được bắt đầu vào năm 2021. Lò phản ứng nước áp lực 125 MWe đa năng này được thiết kế để sản xuất điện, sưởi ấm, sản xuất hơi nước hoặc khử mặn nước biển.

**Tại Nga**, Akademik Lomonosov đưa nhà máy điện hạt nhân nổi đầu tiên trên thế giới vào vận hành thương mại vào tháng 5/ 2020 tại Pevek ở vùng Chkotka, nơi có hai lò phản ứng SMR 35 MWe. Ngoài ra, Rosatom Overseas đã được cấp phép để xây dựng nhà máy điện SMR trên bờ đầu tiên của nước này. Nằm ở Ust-Kuyga miền Viễn Đông Nga, nhà máy này sẽ được trang bị một SMR RITM-200 55 MWe nhằm mục đích sản xuất điện từ năm 2028.

Tại **Nhật Bản**, ưu tiên hướng tới khởi động lại các nhà máy điện hạt nhân hiện có và xây dựng các SMR không được dự tính trong ngắn hạn. Tuy nhiên, Chiến lược tăng trưởng xanh của Bộ Kinh tế, Thương mại và Công nghiệp đã đặt ra mục tiêu cho ngành điện hạt nhân. Những mục tiêu này bao gồm thúc đẩy phát triển và trình diễn công nghệ lò phản ứng nhanh

cho SMR để sản xuất hydro bằng cách sử dụng lò phản ứng khí nhiệt độ cao tới năm 2030. Mục tiêu này sẽ đạt được thông qua hợp tác quốc tế. Năm 2021, Tập đoàn IHI và Tập đoàn JGC Holdings tuyên bố sẽ đầu tư vào NuScale Power trụ sở tại Mỹ để phát triển ở nước ngoài, với Ngân hàng Hợp tác Quốc tế Nhật Bản cũng sẽ bắt đầu tham gia vào năm 2022. Những thành phần khác, chẳng hạn như Mitsubishi Heavy Industries và Hitachi cũng được cho là đang thảo luận chặt chẽ với phía chính phủ Nhật Bản về việc phát triển công nghệ SMR của Nhật Bản, về tính bền vững và cải thiện chuỗi cung ứng.

Tại **Hàn Quốc**, động thái đảo ngược gần đây trong chính sách hạt nhân của chính phủ mới do Tổng thống Yoon dẫn dắt được kỳ vọng sẽ vực dậy ngành công nghiệp hạt nhân của đất nước. Năm 2020, Chính phủ Hàn Quốc và Thành phố về Năng lượng Nguyên tử và Tái tạo của Quốc vương Abdullah (King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy) ở Ả Rập Saudi đã thỏa thuận thành lập một liên doanh xây dựng một SMR 100 MWe sử dụng công nghệ SMART SMR đang được Viện nghiên cứu nguyên tử Hàn Quốc phát triển. Một số công ty Hàn Quốc cũng đang hợp tác với các nhà cung cấp SMR quốc tế.

**Hộp 5. Cộng hòa Séc - Giảm khí thải ở Ceske Budejovice bằng nhiệt sạch từ Nhà máy điện hạt nhân Temelín**

Nhà máy điện hạt nhân Temelín (2 tổ máy, mỗi tổ 1086 MW) nằm ở miền Nam Vùng Bohemia ở Cộng hòa Séc sẽ góp phần cung cấp nhiệt cho thủ phủ của vùng - Ceske Budejovice. Đây là một trong những dự án quan trọng nhất nhằm giảm lượng khí thải cacbon dioxide ở Cộng hòa Séc.

Ngay từ những năm 1980, Nhà máy điện hạt nhân Temelín được kỳ vọng sẽ cấp nhiệt cho Ceske Budejovice. Tuy nhiên, vì nhiều lý do, hệ thống phân phối nhiệt chỉ được mở rộng đến thị trấn Tyn nad Vltavou gần đó, nơi nó đã giúp loại bỏ 22 nhà máy nhiệt đốt than cỡ vừa và ba cơ sở nồi hơi lớn, nghĩa là thị trấn hiện có không khí trong lành nhất ở miền nam Bohemia.

Dự án kết nối thủ phủ vùng hiện nay hỗ trợ mục tiêu bảo vệ khí hậu của Cộng hòa Séc. Dự án sẽ cung cấp nhiệt cho khu nhà ở lớn nhất của thành phố với khoảng 30.000 cư dân và đóng góp khoảng một phần ba tổng lượng cung cấp nhiệt của thành phố, tiết kiệm khoảng 80 kiloton (kt) CO<sub>2</sub> mỗi năm trong ít nhất 30 năm.

Giai đoạn xây dựng đang được thực hiện, với 15 trong số 26 km đường ống nước nóng đã được hoàn thiện. Nước sẽ được làm nóng bằng hơi nước được lấy từ một trong những tuabin tại nhà máy điện hạt nhân Temelín, ở mức tiêu thụ nhiệt tối đa cũng chỉ làm giảm sản lượng điện của nhà máy có vài MW. Để đảm bảo an ninh cung ứng năng lượng, công suất sưởi ấm dự phòng sẽ được duy trì trong trường hợp cần phải thực hiện đồng thời đóng cửa cả hai tổ máy của nhà máy điện.

*Nguồn: CEZ group*

Tại **Vương quốc Anh**, chính phủ đã cam kết tài trợ 210 triệu bảng Anh để phát triển SMR Rolls-Royce, kết hợp với lượng đầu tư tư nhân tương đương (bởi tập đoàn Rolls-Royce, BNF Resources UK Limited và Exelon Generation). Đạo luật (tài trợ) Năng lượng Hạt nhân năm 2022 thiết lập một mô hình cấp tài chính mới cho các dự án năng lượng hạt nhân, được gọi là Cơ sở tài sản được quản lý. Nó nhằm mục đích thu hút đầu tư tư nhân rộng hơn vào cả các lò phản ứng quy mô lớn mới lẫn các SMR và giảm chi phí xây dựng, hóa đơn năng lượng của người tiêu dùng và sự phụ thuộc vào các nhà phát triển nước ngoài về tài chính. Năm 2022, chính phủ công bố Chiến lược An ninh Năng lượng, trong đó đặt ra tham vọng xây dựng tám lò phản ứng lớn mới cũng như các lò phản ứng mô-đun nhỏ để đạt được công suất phát điện

hạt nhân là 24 GWe vào năm 2050, tương đương khoảng 25% nhu cầu điện dự báo ở Vương quốc Anh.

Tại **Pháp**, Kế hoạch tái công nghiệp hóa Pháp 2030, được công bố vào tháng 10 năm 2021, bao gồm một tỷ EUR tài trợ giai đoạn đến năm 2030 cho các thiết kế sáng tạo bao gồm các khái niệm thế hệ IV và SMR nước nhẹ, chẳng hạn như SMR NUWARD được phát triển bởi Tập đoàn Điện lực Pháp với sự đóng góp lớn từ TechnicAtome, Tập đoàn quốc phòng Naval Group, Ủy ban Năng lượng Nguyên tử và Năng lượng Thay thế Pháp, Framatome và Tractebel. Mục tiêu là xây dựng đơn vị SMR đầu tiên ở Pháp vào năm 2030.

Mối quan tâm đến SMR cũng đang tăng lên ở **Bắc, Trung và Đông Âu**, nơi thị trường tiềm năng là rất lớn vì nhiều nước ở đó cần thay thế một lượng lớn nhà máy điện sử dụng nhiên liệu hóa thạch và tăng công suất phát điện để đáp ứng nhu cầu điện ngày càng tăng. Một số nước như Cộng hòa Séc và Ba Lan quan tâm đến công nghệ SMR, đặc biệt để đáp ứng nhu cầu nhiệt công nghiệp và sưởi ấm đô thị. Một số **thị trường mới nổi và các nền kinh tế đang phát triển** cũng đang phát triển lộ trình triển khai SMR, dựa trên lộ trình chung của IAEA, bao gồm xây dựng năng lực tổ chức. SMR khả thi với nhiều quốc gia trong số này, hơn là các nhà máy quy mô lớn do hạn chế về lưới điện và chi phí đầu tư ban đầu thấp hơn.

### **3.4. SMR hướng tới một số nhiệm vụ khó khăn nhất của chuyển đổi năng lượng**

SMR có thể đóng vai trò bổ sung cho năng lượng tái tạo và các công nghệ phát ra lượng khí thải thấp khác nhằm đạt được các mục tiêu không phát thải cả trong cấp điện lên lưới để sản xuất nhiệt và hydro, lẫn khử muối trong nước. Một số dự án hướng tới các ngành công nghiệp có lượng khí thải khó giảm và các ứng dụng cụ thể mà các công nghệ phát thải thấp khác kém hiệu quả về mặt kỹ thuật hoặc kinh tế. Những ứng dụng này bao gồm thay thế các nhà máy điện đốt than, thay thế nhiên liệu hóa thạch để sản xuất nhiệt trong công nghiệp và sưởi ấm đô thị, và nhiều công dụng khác như sản xuất hydro và nhiên liệu tổng hợp dựa trên hydro, khử muối và vận chuyển thương mại.

Thay thế các nhà máy than để cấp điện lên lưới

Khử carbon ngành điện đòi hỏi phải thay thế số lượng lớn các nhà máy điện đốt than và trang bị thêm nhiều nhà máy khác để thu giữ lượng khí thải CO<sub>2</sub>. Ở các quốc gia cởi mở với điện hạt nhân, gần 8.000 tổ máy đốt than sẽ ngừng hoạt động tới năm 2040 trong kịch bản NZE, bao gồm tất cả các nhà máy than ở các nền kinh tế tiên tiến vào năm 2030. Việc tái sử dụng các địa điểm để phát điện phát thải thấp như SMR sẽ mang lại những lợi thế về kỹ thuật và chi phí nhất định, bao gồm cả cơ hội tận dụng những tiện ích tại chỗ hiện có, các tòa nhà và các cơ sở khác, kết nối với mạng lưới truyền tải, nước làm mát và lực lượng lao động địa phương có tay nghề cao sẵn có. Địa phương cũng sẽ hưởng lợi ích kinh tế và xã hội đáng kể từ việc duy trì hoạt động kinh tế và kỹ năng của địa phương.

Ví dụ, chỉ riêng ở châu Âu (không bao gồm các quốc gia phản đối hạt nhân hoặc đang loại bỏ dần nó), các nhà máy với công suất từ 50 MW đến 700 MW tạo ra 34 GW công suất than

lắp đặt, hay 32% tổng số. Trong khi những nhà máy điện đốt than này có thể, tùy từng trường hợp, được thay thế bằng các lò phản ứng lớn đảm bảo sản xuất tương đương điện lên lưới, thì các SMR có công suất từ 200 MW đến 300 MW rất thích hợp để thay thế một phần công suất than đốt này, tùy thuộc vào thời gian và các yếu tố cân nhắc khác. Những sáng kiến khác nhau có thể tạo điều kiện thay thế các nhà máy đốt than bằng các SMR, chẳng hạn như sáng kiến của TerraPraxis nhằm mục đích chuẩn bị các thiết kế được tiêu chuẩn hóa và cấp phép, được hỗ trợ bởi các công cụ thiết kế và phát triển dự án tự động.

### *Thay thế nhiên liệu hóa thạch trong công nghiệp nặng, khai thác ngoại lưới và sưởi ấm đô thị*

Nhiều thiết kế SMR hoạt động ở nhiệt độ cao và có thể tạo ra nguồn phát thải thấp thực sự đầu tiên thay thế cho việc đồng phát điện, nhiệt và hydro bằng nhiên liệu hóa thạch cho khách hàng công nghiệp. Các ngành công nghiệp có thể tận dụng thương mại công nghệ này bao gồm hóa chất, sản xuất thép và amoniac. Một số SMR nhỏ hơn, gồm các lò phản ứng nhỏ cỡ 1 MWe đang được phát triển cho các ứng dụng ngoại lưới, với vai trò là một giải pháp thay thế cho máy phát điện diesel tại các địa điểm khai thác tài nguyên.

Hệ thống sưởi đô thị là một ứng dụng tiềm năng khác. Một số nước và khu vực dựa rất nhiều vào hệ thống sưởi ấm đô thị từ các nhà máy đồng phát điện dựa trên nhiên liệu hóa thạch. Chuyển đổi sang sinh khối có thể khả thi trong một số trường hợp, nhưng những hạn chế về mức độ khả dụng hoặc khả năng tiếp cận nguồn sinh khối bền vững sẽ hạn chế mức độ áp dụng trên toàn cầu. Nếu đạt tới mức chín muồi về mặt thương mại, thì các SMR có thể là một trong số ít giải pháp thiết thực cung cấp nhiên liệu để sưởi ấm đô thị với lượng khí thải thấp.

### *Sản xuất hydro, khử muối và vận chuyển thương mại*

Các nhà máy điện hạt nhân dù lớn hay nhỏ đều rất phù hợp để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về hydro có hàm lượng carbon thấp cũng như nhiên liệu tổng hợp dựa trên hydro. Các lò phản ứng nhiệt độ cao có thể được kết hợp với điện phân nhiệt độ cao hoặc các chu trình nhiệt hóa để sản xuất hydro. Tiềm năng đặt các SMR gần các trung tâm công nghiệp có thể làm tăng khả năng cạnh tranh của hydro dựa trên SMR vì việc này làm giảm chi phí vận chuyển và phân phối hydro, vốn có thể rất tốn kém. SMR cũng có thể được sử dụng để cấp điện cho các nhà máy khử muối hoặc nhằm mục đích cung cấp lực đẩy khí thải thấp cho vận chuyển hàng hải.

#### **IV. MỘT SỐ NÉT VỀ PHÁT TRIỂN NĂNG LƯỢNG Ở VIỆT NAM VÀ KHUYẾN NGHỊ**

Nguồn cung năng lượng không chỉ có vị trí chiến lược trong an ninh quốc phòng, mà còn là yếu tố đầu vào cực kỳ quan trọng cho các mục tiêu phát triển kinh tế, xã hội. Chính vì vậy, khủng hoảng điện cũng có thể gây ra khủng hoảng kinh tế.

Cuộc khủng hoảng điện tại Trung Quốc năm 2021 là một ví dụ điển hình. Cuộc khủng hoảng này không chỉ giáng một đòn nặng nề vào nền kinh tế lớn thứ 2 thế giới, mà còn đe dọa làm gián đoạn chuỗi cung ứng toàn cầu và gia tăng áp lực lạm phát tại nhiều quốc gia. Khi đó, nhiều nhà máy tại Trung Quốc - công xưởng của toàn cầu - buộc phải giảm số ngày làm việc, giảm công suất hoạt động, thậm chí phải đóng cửa vì thiếu hụt điện, trong khi các khu vực dân cư cũng liên tục bị cắt điện. Bên cạnh đó, nguồn cung năng lượng tái tạo sụt giảm và thiếu ổn định cũng khiến vấn đề càng thêm trầm trọng. Ví dụ như khu vực sản xuất thủy điện của Trung Quốc phải vật lộn với thời tiết hạn hán ngày càng thường xuyên hơn. Tình trạng này lại lặp lại trong mùa hè năm 2022, khi nhiều đợt nắng nóng tồ tộ kéo dài gây ra tình trạng hạn hán, khiến mực nước trong các hồ chứa thủy điện tại Trung Quốc xuống thấp và làm giảm công suất phát của các nhà máy thủy điện. Ngược lại, nhu cầu sử dụng điện ngày càng tăng, từ cả khu vực sản xuất khi nền kinh tế bắt đầu phục hồi mạnh sau giai đoạn chống dịch Covid-19 quyết liệt lẫn khu vực dân cư do nhiệt độ nóng lên làm tăng nhu cầu sử dụng thiết bị điều hòa. Bên cạnh đó, nhu cầu sử dụng điện còn tăng do sự phát triển của cuộc cách mạng công nghệ và xu hướng chuyển đổi số, số hóa trong mọi lĩnh vực. Trong khi đó, đầu tư mới vào các dự án sản xuất và phát điện lại đang tụt hậu so với tăng trưởng tiêu thụ điện với tốc độ ngày càng nhanh hơn.

Cuộc khủng hoảng điện của Trung Quốc chính là hồi chuông cảnh báo về một nguy cơ tương tự cho Việt Nam, vốn có những đặc thù như nước láng giềng Trung Quốc, từ vị trí địa lý, tác động của biến đổi khí hậu, cho đến những đặc điểm tương quan trong nền kinh tế. Nhiều chuyên gia từng cảnh báo về một viễn cảnh thiếu hụt điện cho Việt Nam trong tương lai.

Và thực tế, tình trạng thiếu điện cục bộ đã xảy ra vào tháng 5-6/2023 tại Miền Bắc nước ta, làm đảo lộn cuộc sống của người dân và gây không ít tổn thất cho doanh nghiệp. Theo báo cáo của EVN và Trung tâm Điều độ hệ thống điện quốc gia, trong tháng 5/2023, thiếu hụt nguồn cung để đáp ứng nhu cầu phụ tải đỉnh lên đến 5,4 GW. Tình hình được cải thiện trong tháng 6 và đã được giải quyết trong tháng 7 do nguồn nước tăng lên. Thiếu hụt điện trong mùa khô vốn đã diễn ra vào hè năm 2022, vào thời điểm đó thiếu hụt nguồn cung để đáp ứng nhu cầu phụ tải đỉnh rơi vào mức 1,8GW.

Theo Báo cáo vận hành của Trung tâm Điều độ và ước tính của Ngân hàng Thế giới (WB), phí tổn kinh tế của các đợt mất điện vào tháng 5 và 6 vừa qua là khoảng 1,4 tỷ USD (tương đương 0,3% GDP) dựa trên ước tính về nhu cầu chưa được đáp ứng là 36 GWh năm 2022 và khoảng 900 GWh ước tính cho tháng 5-6/2023. WB cũng dẫn lại khảo sát ẩn danh do Phòng Thương mại Châu Âu và các thành viên thực hiện vào tháng 6/2023 trong lĩnh vực công nghiệp, các doanh nghiệp ở miền Bắc cho biết tổn thất về doanh thu lên đến 10%. Căn cứ vào

ước thiếu hụt cung đến tháng 6, nhu cầu năng lượng không được đáp ứng cũng sẽ dẫn đến tổn thất về doanh thu cho Tập đoàn Điện lực Việt Nam (EVN) ở mức ước khoảng 75 triệu USD.

Hệ thống điện Việt Nam có 3 miền: miền Bắc (từ Hà Tĩnh trở ra), miền Trung (từ Quảng Bình đến Khánh Hòa, gồm 4 tỉnh Tây Nguyên) và miền Nam (từ Ninh Thuận trở vào). Các nguồn điện phân bố không đều ở các vùng này (chủ yếu là nhiệt điện than và thủy điện ở miền Bắc, thủy điện ở miền Trung và nhiệt điện khí ở miền Nam). Việc vận hành hệ thống không hiệu quả về mặt kinh tế do phụ thuộc theo mùa và truyền tải điện đường dài. Hơn 90% điện năng cả nước được tiêu thụ ở miền Bắc và miền Nam. Chỉ một tỷ lệ nhỏ, dưới 10% là thuộc về miền Trung. Tỷ trọng tiêu thụ điện của miền Bắc có xu hướng tăng dần (39,2% năm 2011 và 44,1% năm 2020); Tỷ trọng tiêu thụ điện của miền Nam có xu hướng giảm dần (51,1% năm 2011 và 47% năm 2020). So với sự phát triển của các nguồn điện, lưới điện phát triển chậm và điều này đặc biệt đúng đối với các nguồn năng lượng tái tạo, vốn bị phân tán, quy mô nhỏ và vừa và có thể được xây dựng tương đối nhanh, dẫn đến tắc nghẽn cục bộ và một số hạn chế.

Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 (Quy hoạch điện VIII) được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt là tài liệu được công bố gần đây nhất đề ra định hướng phát triển cho ngành năng lượng Việt Nam. Quy hoạch điện VIII nêu rõ tổng công suất các nhà máy điện đến năm 2050 đạt từ 490.529-573.129 MW (không bao gồm xuất khẩu, năng lượng tái tạo để sản xuất năng lượng mới). Trong đó, tiếp tục phát triển mạnh nguồn điện năng lượng tái tạo như: điện gió trên bờ đạt 60.050-77.050 MW (chiếm 12,2-13,4%); điện gió ngoài khơi 70.000-91.500 MW (chiếm 14,3-16%); điện mặt trời đạt từ 168.594-189.294 MW (chiếm 33,0-34,4%); điện sinh khối, điện sản xuất từ rác 6.015 MW (chiếm 1-1,2%). Nguồn thủy điện đến 2050 được phát triển đạt 36.016 MW (chiếm 6,3-7,3%); nguồn điện lưu trữ đạt từ 30.650-45.550 MW (chiếm 6,2-7,9%); điện đồng phát, sử dụng nhiệt dư, khí lò cao, các sản phẩm phụ của dây chuyền công nghệ trong các cơ sở công nghiệp 4.500 MW (chiếm 0,8-0,9%). Đặc biệt sẽ không còn nhiệt điện than (không sử dụng than để phát điện) thay vào đó sẽ phát triển nhiệt điện sử dụng sinh khối và amoniac từ 25.632-32.432 MW (chiếm 4,5-6,6%). Quy hoạch điện VIII được xem là một quy hoạch ngành rất quan trọng, đặc biệt sau khi Việt Nam cam kết đạt mục tiêu phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050 tại Hội nghị Thượng đỉnh về biến đổi khí hậu (COP26) và tham gia Chương trình Đối tác chuyển đổi năng lượng công bằng (JETP).

Viện Năng lượng - đơn vị chủ trì xây dựng Quy hoạch Điện VIII cho biết, tốc độ tăng trưởng nhu cầu sử dụng điện của Việt Nam giai đoạn 2011-2020 đạt trung bình trên 10%/năm. Dự báo phụ tải điện vẫn còn tiếp tục tăng trưởng cao trong giai đoạn 2021-2030 với tốc độ bình quân khoảng 8%/năm và khoảng 4% trong giai đoạn 2030-2045.

Tuy nhiên, nhận định về những mục tiêu của Quy hoạch điện VIII đề ra, một số chuyên gia nước ngoài cho rằng mặc dù đây là một cam kết mạnh mẽ của đất nước trong việc chuyển đổi

năng lượng theo hướng trung hòa carbon nhưng sẽ là “*một con đường đất đỏ*”<sup>17</sup>. Theo quy hoạch, công suất nhiệt điện than dự kiến sẽ đạt khoảng 30 MW, chiếm 20% tổng công suất các nhà máy điện vào năm 2030. Nhưng đến năm 2050, Việt Nam đặt mục tiêu không còn sản xuất điện từ các nhà máy điện than nữa. Quy hoạch cũng chỉ cho phép thực hiện các dự án thuộc Quy hoạch điện VII được điều chỉnh và đang thi công đến năm 2030. Ngoài ra, các nhà máy có tuổi thọ trên 40 năm phải ngừng hoạt động và nếu không phải chuyển đổi sang sinh khối và amoniac để giảm lượng khí thải carbon. Theo số liệu của Quy hoạch điện VIII, điện than chiếm 34,2% trong cơ cấu năng lượng của Việt Nam tính đến tháng 5 năm 2023.

Cũng trong Quy hoạch điện VIII, Chính phủ ước tính cần có vốn đầu tư khoảng 134,7 tỷ USD để đáp ứng phát triển nguồn điện và lưới truyền tải điện trong giai đoạn 2021–2030. Khoảng 119,8 tỷ USD trong số này sẽ dành cho nguồn điện và 14,9 tỷ USD dành cho lưới truyền tải. Trong giai đoạn 2031–2050, Việt Nam sẽ cần đầu tư từ 399,2 tỷ USD đến 523,1 tỷ USD, trong đó khoảng 364,4 tỷ USD - 511,2 tỷ USD sẽ được phân bổ cho nguồn điện, còn 34,8 - 38,6 tỷ USD sẽ được phân bổ cho lưới truyền tải.

Victor Nian, Giám đốc Trung tâm Tài nguyên và Năng lượng chiến lược của Singapo nhận định, kế hoạch loại bỏ dần than sẽ là một thách thức lớn và có thể phải trả giá rất cao, đặc biệt là khi đất nước đang gặp phải tình trạng thiếu điện. Năng lượng tái tạo, ngay cả các dự án có phương án lưu trữ năng lượng, có thể vẫn chưa đủ và không “đủ tính kinh tế” để bù đắp cho việc thay thế than trên diện rộng. Đồng thời, việc này cũng có thể ảnh hưởng đến lưới điện. Theo ông, mặc dù Quy hoạch điện VIII phù hợp với nỗ lực khử carbon và chuyển đổi năng lượng toàn cầu, nhưng Việt Nam có thể sẽ phải đối mặt với những thách thức kỹ thuật, kinh tế và các thách thức khác với chiến lược năng lượng hiện tại. Ông cho rằng “Các nhà hoạch định chiến lược sẽ cần phải rất khôn ngoan để đạt được mục tiêu tắt cả các nhà máy than chuyển sang sử dụng sinh khối/amoniac và hơn 60% nhà máy khí đốt đốt hydro vào năm 2050 trong khi việc sản xuất amoniac và hydro hiện nay còn rất hạn chế”.

### *Năng lượng hạt nhân ở Việt Nam*

Chương trình phát triển điện hạt nhân được Chính phủ Việt Nam áp dụng từ những năm 1970. Đề xuất chủ trương đầu tư dự án điện hạt nhân tại Ninh Thuận được Chính phủ Việt Nam trình Quốc hội vào cuối năm 2009, với dự kiến xây dựng hai nhà máy Ninh Thuận 1 và Ninh Thuận 2 tại huyện Thuận Nam và Ninh Hải, tổng công suất 4.000 MW. Tuy nhiên, sau 7 năm chuẩn bị, tháng 11/2016, Quốc hội quyết định dừng dự án điện hạt nhân Ninh Thuận. Lý do được đưa ra là Việt Nam đang cần nguồn vốn lớn để đầu tư cơ sở hạ tầng và các dự án trọng điểm khác, nhằm tạo động lực cho phát triển kinh tế - xã hội. Tại Quy hoạch điện VIII, năng lượng hạt nhân không còn được góp mặt trong cơ cấu nguồn điện và chính phủ cũng chưa có chủ trương phát triển nguồn năng lượng này.

Tuy nhiên, trong Quyết định số 500/QĐ-TTg, ngày 15/5/2023 của Thủ tướng Chính phủ

---

<sup>17</sup> Victor Nian, Giám đốc Trung tâm Tài nguyên và Năng lượng chiến lược của Singapo

phê duyệt Quy hoạch điện VIII, đã nêu danh mục các đề án/dự án xây dựng và hoàn thiện chính sách, pháp luật, trong đó có “Trung tâm nghiên cứu phát triển điện hạt nhân”. Đề án này phù hợp với Mục d Điều 3 trong Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu đến năm 2050, được phê duyệt qua Quyết định số 896/QĐ-TTg ngày 26/7/2022 là: “tiếp thu, ứng dụng, phát triển công nghệ lò phản ứng hạt nhân”. Như vậy, có thể thấy chủ trương tiếp tục nghiên cứu để ứng dụng điện hạt nhân trong tương lai đã được khẳng định.

Đồng thời, một số chuyên gia đầu ngành đề xuất Việt Nam nên khởi động lại phát triển điện hạt nhân để đạt mục tiêu trung hoà carbon vào năm 2050 theo cam kết tại COP26. Ông Nguyễn Mạnh Hiến, nguyên Viện trưởng Viện Năng lượng cho rằng "Nếu phát triển điện hạt nhân sau năm 2030, mới có thể hiện thực hoá mục tiêu "net zero" vào năm 2050 theo cam kết của Thủ tướng tại COP26"<sup>18</sup>.

Như vậy, có thể thấy, vừa đáp ứng được mục tiêu không phát thải vừa góp phần đảm bảo an ninh năng lượng để phát triển kinh tế và lại hợp lý về khía cạnh kinh tế thì điện hạt nhân chính là năng lượng đầy tiềm năng để góp phần đưa Quy hoạch điện VIII đi vào thực tiễn:

Thứ nhất, về an ninh năng lượng, hầu như không có ngừng phát do sự cố, giá điện rất ổn định (80% - 90% chi phí là chi phí cố định). Ngoài ra, điện hạt nhân sẽ là năng lượng bán nội địa, không bị ảnh hưởng bởi tình hình ở các quốc gia khác. (Ngay cả khi uranium phải nhập khẩu, một khi nhiên liệu được đưa vào lò phản ứng, nó sẽ tiếp tục cháy trong khoảng 3 đến 4 năm, do đó, điện hạt nhân không bị ảnh hưởng bởi sự gián đoạn nhiên liệu tạm thời hoặc biến động giá cả). Nguồn điện hạt nhân có đời sống dự án dài (50 năm), cao hơn nhiều các loại hình nhiệt điện khác (nhiệt điện than: 30 năm, nhà máy điện tua bin khí chu trình hỗn hợp: 25 năm).

Thứ hai, về môi trường, điện hạt nhân không phát thải khí nhà kính, bụi và các khí thải độc hại khác. Nếu các cơ chế về thị trường CO<sub>2</sub>, hoặc thuế CO<sub>2</sub> được áp dụng trong tương lai sẽ giúp tăng khả năng cạnh tranh của điện hạt nhân so với các loại hình công nghệ sử dụng năng lượng hóa thạch.

Thứ ba, góp phần đa dạng hóa các nguồn năng lượng: Nếu cơ cấu nguồn điện phụ thuộc quá mức vào một loại hình nhiên liệu, sẽ có lo ngại nếu xảy ra sự cố với loại nguồn điện đó (như thiếu nhiên liệu, giá cả thị trường cao), chi phí cung cấp sẽ tăng lên và vấn đề thiếu điện sẽ xảy ra. Việc nhập khẩu than và khí hóa lỏng (LNG) với quy mô lớn cũng sẽ khá thách thức. Nếu điện hạt nhân được đưa vào phát triển sẽ có tác dụng tránh sự phụ thuộc quá mức vào than và khí nhập khẩu.

Nghiên cứu của Viện Năng lượng cho thấy hiện nay các lò SMR là xu thế phát triển trong ngành điện hạt nhân. Công nghệ lò điện hạt nhân quy mô nhỏ này có thể sử dụng cùng loại nhiên liệu và có những cải tiến về độ an toàn, đặc biệt các tính năng an toàn thụ động gần như trở thành yếu tố bắt buộc với các lò quy mô nhỏ. Dự kiến, các lò SMR giảm chi phí và thời

---

<sup>18</sup> <https://vnexpress.net/chuyen-gia-de-xuat-phat-trien-dien-hat-nhan-sau-nam-2030-4448701.html>



gian xây dựng với tiến độ xây dựng dự kiến khá ngắn (24 - 36 tháng), đồng thời chúng có thể được triển khai từng bước để phù hợp với nhu cầu năng lượng ngày càng tăng. So với các lò hiện nay đang vận hành phát điện, các thiết kế SMR được đề xuất thường đơn giản hơn và an toàn do là SMR dựa vào các hệ thống thụ động và các đặc tính an toàn nội tại của lò phản ứng. Điều này có nghĩa là trong những trường hợp bất thường, không cần sự can thiệp của con người, hoặc lực lượng bên ngoài để tắt các hệ thống, bởi vì các hệ thống thụ động dựa vào các hiện tượng vật lý (chẳng hạn như tuần hoàn tự nhiên, đối lưu, trọng lực và tự điều áp). Ngoài ra, các lò SMR (300 MW) nước nhẹ sẽ có mức nhiệt độ thấp hơn nhiều so với các nhà máy lớn (1.000 MW) và do đó, sẽ ít cần làm mát hơn sau khi dừng lò phản ứng, tránh được thảm họa hạt nhân như đã xảy ra tại Nhà máy điện hạt nhân Fukushima, ảnh hưởng đến môi trường.

Những mối quan ngại về tác động của rác thải hạt nhân tới môi trường cũng như nỗi lo sợ về các thảm họa hạt nhân khiến nhiều người đang lưỡng lự năng lượng hạt nhân. Nhưng cùng với những tiến bộ công nghệ năng lượng hạt nhân và nhu cầu năng lượng cấp thiết, xã hội đang dần có cách nhìn cởi mở hơn với nguồn năng lượng này.

Từ những điểm nêu trên có thể thấy năng lượng hạt nhân đổi mới sáng tạo có thể cách mạng hóa cơ cấu năng lượng của đất nước. Thách thức “net zero” mà chúng ta sắp phải đối mặt là rất khó khăn. Để đạt được trung hòa carbon, chúng ta phải triển khai đầy đủ các công nghệ sạch. Nếu không có năng lượng sạch trong toàn bộ nền kinh tế, chúng ta sẽ không thể giảm một nửa lượng khí thải vào năm 2030 và loại bỏ chúng vào năm 2050. Năng lượng là trung tâm của các nỗ lực chống khủng hoảng khí hậu, vì vậy chúng ta cần tắt cả các nguồn năng lượng không phát thải khả dụng. Sự kết hợp giữa năng lượng tái tạo và năng lượng hạt nhân có thể là hy vọng tốt nhất giúp chúng ta loại bỏ carbon vào giữa thế kỷ này. Chính vì vậy, chúng ta cần xem xét, đánh giá lại tiềm năng của điện hạt nhân để sớm hoạch định chiến lược nắm bắt công nghệ hạt nhân đổi mới sáng tạo để có thể chủ động ứng phó với nhu cầu về năng lượng trong tương lai.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. IEA, Net Zero in 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, Paris, 2021
2. Climate Watch, Net-Zero Tracker, World Resources Institute, Washington, DC, 2020.
3. Gospodarczyk, M., Nuclear power proves its vital role as an adaptable, reliable supplier of electricity during COVID-19, IAEA, Vienna, 2021
4. IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Reference Data Series 1/41, Vienna, 2021.
5. Nuclear power and Secure energy transitions: From today's challenges to tomorrow's clean energy systems. IEA report, 2022
6. Global greenhouse gas emission by sector. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#energy-electricity-heat-and-transport-73-2>
7. <https://davidsuzuki.org/story/is-smaller-better-when-it-comes-to-nuclear/>
8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262202131X>
9. <https://www.orano.group/en/unpacking-nuclear/is-nuclear-power-a-renewable-energy>
10. Nuclear energy for a net Zero World, IAEA report, 2021
11. <https://nangluongvietnam.vn/du-bao-ve-kha-nang-phat-trien-dien-hat-nhan-cua-vietnam-30775.html>
12. <https://vnexpress.net/chuyen-gia-de-xuat-phat-trien-dien-hat-nhan-sau-nam-2030-4448701.html>
13. <https://asian-power.com/regulation/exclusive/expensive-pathway-awaits-vietnam-trails-achieve-pdp8-targets>
14. <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=a7f5719d-93ef-4415-9e28-961b311daf35>