

BẢN TIN KHOA HỌC

KHOÁNG SẢN CHIẾN LƯỢC VÀ ĐẤT HIẾM – NỀN TẢNG TÀI NGUYÊN CHO CHUYỂN DỊCH NĂNG LƯỢNG VÀ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

TÓM TẮT

Khoáng sản chiến lược và đất hiếm (Rare Earth Elements – REE) giữ vai trò nền tảng và không thể thay thế trong tiến trình chuyển dịch năng lượng, phát triển công nghệ cao và bảo đảm an ninh kinh tế – công nghiệp của các quốc gia trong thế kỷ XXI. Đây là nhóm tài nguyên khoáng sản có ý nghĩa đặc biệt đối với các ngành công nghiệp then chốt như năng lượng tái tạo, giao thông điện hóa, điện tử – vi mạch, quốc phòng, hàng không vũ trụ và công nghiệp vật liệu mới, đồng thời có đặc điểm chung là chuỗi cung ứng dễ bị tổn thương, công nghệ chế biến phức tạp và mức độ phụ thuộc cao vào một số khu vực sản xuất nhất định trên thế giới.

Trong lĩnh vực chuyển dịch năng lượng, khoáng sản chiến lược và đất hiếm là cơ sở vật chất quyết định hiệu suất và tính bền vững của các công nghệ năng lượng sạch. Các nguyên tố đất hiếm như neodymium (Nd), praseodymium (Pr), dysprosium (Dy) và terbium (Tb) là thành phần cốt lõi để chế tạo nam châm vĩnh cửu hiệu suất cao (Nd-Fe-B), được sử dụng rộng rãi trong tua-bin gió, động cơ xe điện, máy phát điện và các hệ thống truyền động tiết kiệm năng lượng. Song song với đó, các khoáng sản chiến lược khác như lithium (Li), cobalt (Co), nickel (Ni), manganese (Mn) và graphite đóng vai trò quyết định trong công nghệ pin lưu trữ năng lượng, giúp nâng cao mật độ năng lượng, độ bền chu kỳ và độ an toàn của pin, qua đó hỗ trợ mở rộng quy mô điện gió – điện mặt trời và tăng khả năng ổn định của hệ thống điện quốc gia.

BẢN TIN KHOA HỌC – KHOÁNG SẢN CHIẾN LƯỢC VÀ ĐẤT HIẾM

Trong lĩnh vực công nghệ cao và công nghiệp hiện đại, đất hiếm và khoáng sản chiến lược là vật liệu không thể thiếu để sản xuất các linh kiện điện tử, vật liệu quang học, laser, cảm biến, màn hình hiển thị, chất bán dẫn, hợp kim siêu bền và vật liệu chức năng tiên tiến. Việc ứng dụng các nguyên tố này cho phép giảm kích thước thiết bị, nâng cao hiệu suất, tiết kiệm năng lượng và kéo dài tuổi thọ sản phẩm, từ đó thúc đẩy mạnh mẽ quá trình số hóa, tự động hóa và phát triển các ngành công nghiệp mũi nhọn. Trong lĩnh vực quốc phòng và an ninh, khoáng sản chiến lược còn giữ vai trò đặc biệt quan trọng trong chế tạo các hệ thống dẫn đường chính xác, radar, thiết bị viễn thông và vật liệu chuyên dụng có tính năng vượt trội.

Tuy nhiên, giá trị chiến lược của đất hiếm và khoáng sản chiến lược không chỉ nằm ở trữ lượng tài nguyên mà chủ yếu tập trung ở khả năng làm chủ chuỗi giá trị hoàn chỉnh, từ điều tra – đánh giá tài nguyên, khai thác, tuyển – tách, tinh luyện đến sản xuất vật liệu trung gian và sản phẩm cuối cùng. Quá trình chế biến đất hiếm và nhiều khoáng sản chiến lược đòi hỏi công nghệ cao, tiêu tốn nhiều hóa chất và năng lượng, đồng thời tiềm ẩn các rủi ro môi trường, đặc biệt là vấn đề xử lý chất thải và các nguyên tố phóng xạ đi kèm (như Th, U) trong một số loại quặng. Do đó, việc phát triển các công nghệ chế biến sạch, tiết kiệm tài nguyên, thân thiện môi trường, gắn với mô hình kinh tế tuần hoàn và tái chế đất hiếm từ chất thải công nghiệp – điện tử, đang trở thành xu hướng tất yếu trên phạm vi toàn cầu.

Trong bối cảnh cạnh tranh địa – kinh tế ngày càng gia tăng, nhiều quốc gia đã coi khoáng sản chiến lược và đất hiếm là trụ cột của an ninh tài nguyên quốc gia, đồng thời triển khai các chiến lược đa dạng hóa nguồn cung, tăng cường dự trữ, thúc đẩy hợp tác quốc tế và đầu tư mạnh cho nghiên cứu – phát triển công nghệ chế biến sâu. Đối với Việt Nam, việc nhận diện đúng vai trò của khoáng sản chiến lược và đất hiếm, gắn phát triển tài nguyên với bảo vệ môi trường, chuyển giao công nghệ và đào tạo nguồn nhân lực chất lượng cao, có ý nghĩa quyết định

trong việc nâng cao năng lực tự chủ, tham gia sâu vào chuỗi cung ứng toàn cầu và phục vụ mục tiêu phát triển bền vững của đất nước.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cuộc cách mạng năng lượng gắn với mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính và quá trình số hóa toàn cầu đang làm thay đổi sâu sắc mô hình phát triển kinh tế – xã hội của các quốc gia. Việc chuyển dịch từ các nguồn năng lượng hóa thạch truyền thống sang năng lượng tái tạo, cùng với sự bùng nổ của công nghệ số, công nghiệp thông minh và giao thông điện hóa, đã và đang tạo ra nhu cầu ngày càng lớn đối với các loại khoáng sản chiến lược, đặc biệt là đất hiếm và các kim loại then chốt phục vụ công nghệ cao. Trong bối cảnh đó, khoáng sản không chỉ còn là đầu vào của các ngành công nghiệp khai thác – chế biến truyền thống mà đã trở thành yếu tố quyết định năng lực cạnh tranh, mức độ tự chủ công nghiệp và an ninh kinh tế quốc gia.

Quá trình chuyển dịch năng lượng đòi hỏi sự phát triển nhanh chóng của các công nghệ điện gió, điện mặt trời, lưu trữ năng lượng và hệ thống lưới điện thông minh. Các công nghệ này phụ thuộc trực tiếp vào nguồn cung ổn định của nhiều loại khoáng sản chiến lược như đất hiếm cho nam châm vĩnh cửu, lithium, cobalt, nickel, manganese cho pin lưu trữ và đồng cho hạ tầng truyền tải điện. Song song với đó, làn sóng số hóa, tự động hóa và trí tuệ nhân tạo đang thúc đẩy nhu cầu mạnh mẽ đối với các vật liệu đặc biệt dùng trong sản xuất linh kiện điện tử, chất bán dẫn, cảm biến, thiết bị viễn thông và vật liệu chức năng, làm gia tăng đáng kể áp lực lên chuỗi cung ứng khoáng sản toàn cầu.

Tuy nhiên, nguồn cung khoáng sản chiến lược và đất hiếm trên thế giới có đặc điểm phân bố không đồng đều, chuỗi khai thác – chế biến mang tính tập trung cao và phụ thuộc lớn vào một số quốc gia, trong khi công nghệ chế biến sâu đòi hỏi trình độ kỹ thuật phức tạp, vốn đầu tư lớn và tiêu chuẩn môi trường nghiêm ngặt. Những yếu tố này khiến thị trường khoáng sản chiến lược dễ bị tổn thương

trước các biến động địa chính trị, gián đoạn chuỗi cung ứng và thay đổi chính sách thương mại. Thực tế trong những năm gần đây cho thấy nhiều quốc gia đã phải đối mặt với nguy cơ thiếu hụt nguyên liệu đầu vào cho các ngành công nghiệp mũi nhọn, từ đó thúc đẩy việc xây dựng các chiến lược quốc gia về khoáng sản chiến lược và an ninh tài nguyên.

Trong bối cảnh đó, khoáng sản chiến lược và đất hiếm ngày càng được nhìn nhận không chỉ dưới góc độ tài nguyên thiên nhiên mà còn là tài sản chiến lược gắn với phát triển dài hạn, đòi hỏi cách tiếp cận tổng hợp từ điều tra – đánh giá tài nguyên, khai thác, chế biến, quản lý môi trường đến phát triển công nghệ và nguồn nhân lực. Việc thiếu hụt thông tin khoa học đầy đủ, công nghệ chế biến phù hợp và chính sách đồng bộ có thể dẫn đến nguy cơ khai thác kém hiệu quả, thất thoát tài nguyên và tác động tiêu cực đến môi trường, đồng thời làm giảm khả năng tham gia sâu vào chuỗi giá trị toàn cầu.

Đối với Việt Nam, quá trình công nghiệp hóa, hiện đại hóa gắn với mục tiêu phát triển kinh tế xanh và kinh tế số đang đặt ra yêu cầu cấp thiết phải nhận diện rõ vai trò, tiềm năng và thách thức liên quan đến khoáng sản chiến lược và đất hiếm. Trong khi Việt Nam được đánh giá là quốc gia có triển vọng về một số loại khoáng sản chiến lược, đặc biệt là đất hiếm, thì việc khai thác và chế biến hiện nay vẫn còn nhiều hạn chế, chủ yếu dừng ở khâu sơ chế, chưa hình thành được chuỗi giá trị hoàn chỉnh. Do đó, việc nghiên cứu, tổng hợp và phân tích một cách hệ thống về khoáng sản chiến lược và đất hiếm có ý nghĩa quan trọng, nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho công tác quản lý nhà nước, định hướng đầu tư, phát triển công nghệ và hợp tác quốc tế, phục vụ mục tiêu phát triển bền vững của đất nước trong giai đoạn mới.

2. KHÁI NIỆM VÀ PHÂN LOẠI

Khoáng sản chiến lược là các loại khoáng sản có vai trò thiết yếu đối với sự phát triển kinh tế – xã hội, bảo đảm an ninh năng lượng, công nghiệp và quốc

BẢN TIN KHOA HỌC – KHOÁNG SẢN CHIẾN LƯỢC VÀ ĐẤT HIẾM

phòng, đồng thời có ảnh hưởng trực tiếp đến năng lực cạnh tranh và mức độ tự chủ của một quốc gia trong bối cảnh toàn cầu hóa và chuyển dịch công nghệ. Khái niệm “khoáng sản chiến lược” không chỉ được xác định dựa trên giá trị kinh tế đơn thuần hay trữ lượng địa chất, mà còn phụ thuộc vào tính không thể thay thế trong các ngành công nghiệp then chốt, mức độ rủi ro gián đoạn nguồn cung, yêu cầu công nghệ khai thác – chế biến và vai trò của khoáng sản đó trong chuỗi giá trị sản xuất hiện đại.

Về bản chất, một loại khoáng sản được coi là chiến lược khi đáp ứng đồng thời nhiều tiêu chí, bao gồm: (i) có tầm quan trọng đặc biệt đối với các ngành công nghiệp mũi nhọn như năng lượng tái tạo, công nghệ cao, quốc phòng, hàng không vũ trụ và hạ tầng số; (ii) có nguồn cung hạn chế hoặc phân bố không đồng đều trên phạm vi toàn cầu, dẫn đến nguy cơ phụ thuộc nhập khẩu cao; (iii) khó có vật liệu thay thế hiệu quả trong ngắn hạn hoặc trung hạn; và (iv) chuỗi khai thác – chế biến – tinh luyện đòi hỏi công nghệ phức tạp, vốn đầu tư lớn và tiêu chuẩn môi trường nghiêm ngặt. Do đó, khoáng sản chiến lược thường gắn liền với các chính sách quốc gia về an ninh tài nguyên và phát triển công nghiệp bền vững.

Trong nhóm khoáng sản chiến lược, đất hiếm (Rare Earth Elements – REE) được xem là một phân nhóm đặc biệt quan trọng. Nhóm đất hiếm bao gồm 17 nguyên tố hóa học, gồm scandium (Sc), yttrium (Y) và 15 nguyên tố thuộc nhóm lanthanide (từ lanthanum – La đến lutetium – Lu). Mặc dù có tên gọi là “hiếm”, nhiều nguyên tố đất hiếm không thực sự khan hiếm về mặt hàm lượng trong vỏ Trái đất, nhưng chúng hiếm khi tập trung thành các thân quặng có hàm lượng kinh tế, và đặc biệt khó tách – tinh luyện do tính chất hóa học tương đồng giữa các nguyên tố trong nhóm.

Xét theo đặc điểm hóa học và công nghệ, đất hiếm thường được phân loại thành hai nhóm chính. Đất hiếm nhẹ (Light Rare Earth Elements – LREE) bao gồm các nguyên tố từ La đến Sm, thường xuất hiện với hàm lượng tương đối cao hơn và

được sử dụng phổ biến trong xúc tác dầu khí, sản xuất pin niken–kim loại hydride, thủy tinh và vật liệu đánh bóng. Đất hiếm nặng (Heavy Rare Earth Elements – HREE), bao gồm các nguyên tố từ Eu đến Lu cùng với yttrium (Y), có trữ lượng ít hơn nhưng lại giữ vai trò then chốt trong các ứng dụng công nghệ cao như nam châm vĩnh cửu chịu nhiệt, vật liệu laser, linh kiện điện tử chính xác và các hệ thống quốc phòng hiện đại. Chính giá trị công nghệ và mức độ khan hiếm này khiến HREE được xếp vào nhóm khoáng sản có ý nghĩa chiến lược đặc biệt.

Bên cạnh đất hiếm, nhóm khoáng sản chiến lược còn bao gồm nhiều kim loại và khoáng sản quan trọng khác như lithium, cobalt, nickel, manganese, graphite, tungsten, antimony, titanium và một số kim loại hiếm khác. Các khoáng sản này có thể được phân loại theo mục đích sử dụng chủ đạo, bao gồm: (i) khoáng sản phục vụ lưu trữ và chuyển đổi năng lượng (Li, Co, Ni, Mn, graphite); (ii) khoáng sản phục vụ sản xuất vật liệu từ tính và vật liệu chức năng (đất hiếm, W); (iii) khoáng sản phục vụ công nghiệp quốc phòng và công nghệ đặc biệt (Sb, Ti, một số kim loại hiếm); và (iv) khoáng sản nền tảng cho hạ tầng công nghiệp và công nghệ số (Cu, Al có tính chiến lược trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng).

Ngoài cách phân loại theo thành phần hóa học và công dụng, khoáng sản chiến lược còn có thể được phân loại theo vị trí trong chuỗi giá trị, từ khoáng sản nguyên khai, sản phẩm tuyển – tinh quặng, sản phẩm tinh luyện (oxit, kim loại) đến vật liệu trung gian và sản phẩm công nghệ cao. Cách tiếp cận này cho thấy giá trị chiến lược thực sự không nằm ở khâu khai thác thô mà ở năng lực làm chủ công nghệ chế biến sâu và sản xuất vật liệu, nơi tạo ra giá trị gia tăng cao nhất và quyết định vị thế của quốc gia trong chuỗi cung ứng toàn cầu.

Như vậy, khái niệm và phân loại khoáng sản chiến lược, đặc biệt là đất hiếm, cần được nhìn nhận theo hướng đa chiều, gắn với bối cảnh phát triển kinh tế – công nghệ của từng giai đoạn. Việc hiểu đúng bản chất, đặc điểm và cách phân loại khoáng sản chiến lược là cơ sở khoa học quan trọng để xây dựng các chiến

lược điều tra, khai thác, chế biến, quản lý và sử dụng tài nguyên khoáng sản một cách hiệu quả, bền vững và phù hợp với lợi ích quốc gia.

3. VAI TRÒ TOÀN CẦU

Khoáng sản chiến lược và đất hiếm giữ vai trò toàn cầu vì chúng là nền tảng vật chất cho quá trình chuyển dịch năng lượng, số hóa và phát triển công nghệ cao, đồng thời tác động trực tiếp đến an ninh chuỗi cung ứng, sức cạnh tranh công nghiệp và vị thế địa-kinh tế của các quốc gia. Không giống các hàng hóa nguyên liệu truyền thống, nhóm khoáng sản này thường có đặc trưng: (i) gắn chặt với các ngành mũi nhọn và công nghệ lõi; (ii) nguồn cung phân bố không đồng đều, chuỗi chế biến tập trung; (iii) khó thay thế trong ngắn hạn; và (iv) quyết định khả năng “làm chủ vật liệu” trong sản xuất hiện đại. Vì vậy, vai trò của khoáng sản chiến lược và đất hiếm ngày càng được nhìn nhận như một trụ cột của an ninh kinh tế và an ninh năng lượng toàn cầu.

3.1. Nền tảng cho chuyển dịch năng lượng và mục tiêu khí hậu

Trên phạm vi toàn cầu, quá trình giảm phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch và mở rộng năng lượng tái tạo làm nhu cầu khoáng sản chiến lược tăng nhanh ở cả khâu sản xuất thiết bị và hạ tầng hệ thống. Các nguyên tố đất hiếm (đặc biệt Nd, Pr, Dy, Tb) đóng vai trò trung tâm trong chế tạo nam châm vĩnh cửu hiệu suất cao, là “trái tim” của nhiều công nghệ năng lượng sạch: tua-bin gió công suất lớn, động cơ hiệu suất cao, máy phát điện và hệ thống truyền động tiết kiệm năng lượng. Song song, nhóm khoáng sản như Li, Co, Ni, Mn, graphite là nền tảng của pin lưu trữ năng lượng, giúp điện khí hóa giao thông (xe điện, xe buýt điện, logistics) và tích hợp năng lượng tái tạo vào lưới điện thông minh. Đồng (Cu) và nhôm (Al), dù phổ biến hơn, lại mang tính chiến lược do nhu cầu tăng mạnh cho hệ thống truyền tải – phân phối điện, hạ tầng sạc, trạm biến áp và thiết bị điện. Nói cách khác, quy mô và tốc độ chuyển dịch năng lượng toàn cầu bị chi phối bởi khả năng bảo đảm

nguồn cung khoáng sản chiến lược ở mức ổn định, bền vững và phù hợp tiêu chuẩn môi trường.

3.2. Động lực của công nghệ cao và kinh tế số

Cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 và kinh tế số làm gia tăng nhu cầu vật liệu có tính năng đặc biệt: từ điện tử – viễn thông, quang học, cảm biến đến vật liệu siêu bền và vật liệu chức năng. Đất hiếm được sử dụng trong sản xuất phosphor cho màn hình, laser, sợi quang, chất xúc tác, vật liệu đánh bóng chính xác, cũng như trong các hợp kim và linh kiện yêu cầu độ ổn định cao. Nhiều khoáng sản chiến lược khác như tungsten (W) dùng cho hợp kim cứng, dụng cụ cắt và các chi tiết chịu mài mòn; antimony (Sb) có ứng dụng trong vật liệu chống cháy và một số công nghệ đặc biệt; titanium (Ti) quan trọng trong hàng không, y sinh và vật liệu nhẹ bền. Khi nhu cầu về chip, trung tâm dữ liệu, AI và tự động hóa gia tăng, sự phụ thuộc vào các vật liệu “nhỏ nhưng quyết định” ngày càng rõ rệt: thiếu vật liệu sẽ làm gián đoạn sản xuất, dù chỉ thiếu một tỷ lệ nhỏ trong cấu trúc sản phẩm.

3.3. Yếu tố quyết định an ninh chuỗi cung ứng và ổn định thị trường

Thị trường khoáng sản chiến lược có tính nhạy cảm cao do rủi ro “điểm nghẽn” ở một hoặc vài mắt xích: mỏ, tinh quặng, hóa chất tách – tinh luyện, hoặc sản phẩm trung gian (oxit/kim loại, hợp kim). Bất kỳ sự cố nào (biến động địa chính trị, chính sách thương mại, gián đoạn vận tải, thiên tai, dịch bệnh, thay đổi quy định môi trường) cũng có thể gây biến động giá và thiếu hụt nguồn cung. Vì vậy, nhiều quốc gia coi khoáng sản chiến lược là nội dung trọng tâm của chính sách công nghiệp: đa dạng hóa nguồn nhập khẩu, xây dựng dự trữ, phát triển năng lực chế biến trong nước, liên kết đối tác tin cậy và thúc đẩy tái chế. Từ góc nhìn kinh tế quốc tế, khoáng sản chiến lược trở thành biến số quan trọng tác động đến dòng đầu tư, lựa chọn địa điểm đặt nhà máy, và khả năng mở rộng của các ngành công nghệ cao.

3.4. Tập trung giá trị ở khâu chế biến sâu và vật liệu

Giá trị chiến lược không nằm chủ yếu ở việc khai thác quặng, mà tập trung ở khả năng sản xuất sản phẩm tinh luyện và vật liệu: oxit REE tinh khiết, kim loại REE, hợp kim nam châm, vật liệu cathode/anode, hợp kim đặc chủng... Đây là các khâu đòi hỏi công nghệ cao, hệ thống kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt, và thường yêu cầu quy mô công nghiệp. Các quốc gia làm chủ công nghệ chế biến sâu có khả năng kiểm soát “điểm nghẽn” của chuỗi cung ứng, tạo giá trị gia tăng cao, đồng thời định hình tiêu chuẩn thị trường. Ngược lại, quốc gia chỉ khai thác thô có nguy cơ rơi vào bẫy “xuất tài nguyên – nhập công nghệ”, chịu biến động giá và hạn chế năng lực phát triển công nghiệp nội địa.

3.5. Tác động mạnh đến chính sách môi trường – xã hội và chuẩn mực quản trị xã hội môi trường (Environmental Social Governance -ESG)

Khai thác và chế biến đất hiếm cùng nhiều khoáng sản chiến lược có thể phát sinh thách thức môi trường: chất thải rắn, nước thải, tiêu hao hóa chất, phát thải carbon, và trong một số trường hợp là quản lý tạp chất phóng xạ đi kèm. Trên bình diện toàn cầu, yêu cầu tuân thủ ESG đang trở thành “giấy thông hành” cho sản phẩm khoáng sản đi vào thị trường và chuỗi cung ứng của các tập đoàn lớn. Điều này thúc đẩy xu thế phát triển công nghệ khai thác sạch, tối ưu hóa tuyển – tách, tuần hoàn nước, giảm hóa chất, phục hồi môi trường sau khai thác và minh bạch nguồn gốc (truy xuất nguồn gốc). Vì vậy, vai trò toàn cầu của khoáng sản chiến lược không chỉ gắn với sản lượng, mà còn gắn với tính bền vững và mức độ đáp ứng tiêu chuẩn quốc tế.

3.6. Thúc đẩy đổi mới công nghệ: thay thế – tiết kiệm – tái chế

Sức ép nguồn cung toàn cầu thúc đẩy mạnh mẽ các hướng đổi mới: (i) thiết kế vật liệu giảm hàm lượng nguyên tố hiếm; (ii) phát triển công nghệ pin và nam châm ít phụ thuộc vào một số nguyên tố; (iii) tái chế đất hiếm từ nam châm thải, thiết bị điện tử, pin đã qua sử dụng; và (iv) khai thác từ các nguồn thứ cấp (bùn thải, chất thải công nghiệp). Tái chế được xem là mảnh ghép quan trọng để giảm

áp lực khai thác sơ cấp, tăng tự chủ nguồn cung và giảm tác động môi trường. Trên bình diện toàn cầu, đây là hướng đi ngày càng được ưu tiên cùng với khai thác và chế biến truyền thống.

3.7. Ý nghĩa địa–kinh tế và cạnh tranh chiến lược

Khoáng sản chiến lược và đất hiếm đang trở thành “điểm nóng” của cạnh tranh địa–kinh tế: quốc gia nào kiểm soát tốt chuỗi cung ứng sẽ có lợi thế trong thương mại, công nghệ và an ninh quốc gia. Hệ quả là nhiều nước tăng cường thiết lập liên minh cung ứng, ký kết thỏa thuận đối tác, hỗ trợ doanh nghiệp đầu tư ra nước ngoài, và xây dựng chính sách nội địa nhằm giảm phụ thuộc vào một nguồn cung duy nhất. Từ đó, khoáng sản chiến lược không chỉ là vấn đề tài nguyên mà đã trở thành một phần của chiến lược công nghiệp và chiến lược đối ngoại.

3.8. Hàm ý đối với các quốc gia có tiềm năng tài nguyên

Đối với các quốc gia có triển vọng khoáng sản chiến lược, vai trò toàn cầu của nhóm tài nguyên này mở ra cơ hội lớn để tham gia chuỗi giá trị, thu hút đầu tư và phát triển công nghiệp vật liệu. Tuy nhiên, cơ hội chỉ trở thành lợi ích thực sự khi có: (i) dữ liệu địa chất tin cậy; (ii) công nghệ khai thác – chế biến phù hợp; (iii) cơ chế chính sách ổn định; (iv) quản trị môi trường chặt chẽ; và (v) định hướng phát triển theo chuỗi giá trị, tránh xuất khẩu thô. Nói cách khác, “vai trò toàn cầu” của khoáng sản chiến lược vừa là cơ hội, vừa là thách thức về quản trị tài nguyên, công nghệ và phát triển bền vững.

4. CUNG – CẦU THẾ GIỚI

4.1. Tổng quan cung – cầu trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng

Cung – cầu khoáng sản chiến lược và đất hiếm trên phạm vi toàn cầu đang chịu tác động đồng thời của ba động lực lớn: chuyển dịch năng lượng, bùng nổ công nghệ số và tái cấu trúc chuỗi cung ứng. Ở phía cầu, nhu cầu tăng nhanh và có xu hướng dài hạn do điện gió, điện mặt trời, xe điện, lưu trữ năng lượng, trung tâm dữ liệu và tự động hóa công nghiệp. Ở phía cung, việc mở rộng khai thác và đặc

biệt là chế biến sâu diễn ra chậm hơn do rào cản công nghệ, vốn đầu tư lớn và yêu cầu môi trường nghiêm ngặt. Sự lệch pha này tạo ra áp lực thiếu hụt cục bộ, biến động giá và rủi ro gián đoạn nguồn cung.

4.2. Phía cầu: tăng trưởng nhanh, cấu trúc nhu cầu thay đổi

Nhu cầu khoáng sản chiến lược tăng không đồng đều giữa các nhóm ứng dụng. Năng lượng tái tạo và giao thông điện hóa là động lực tăng trưởng mạnh nhất đối với REE (nam châm vĩnh cửu), Li–Ni–Co–Mn (pin), Cu–Al (hạ tầng điện). Công nghệ cao và quốc phòng tạo ra nhu cầu ổn định nhưng yêu cầu chất lượng cao, độ tinh khiết lớn và khả năng cung ứng tin cậy. Đáng chú ý, đất hiếm nặng (HREE) có tốc độ tăng cầu cao hơn nguồn cung do vai trò then chốt trong nam châm chịu nhiệt, laser và điện tử chính xác, khiến thị trường HREE thường xuyên ở trạng thái căng thẳng.

4.3. Phía cung: phân bố không đều và “điểm nghẽn” chế biến

Nguồn cung khoáng sản chiến lược và REE phân bố không đồng đều theo địa chất và bị chi phối bởi năng lực tách – tinh luyện. Trong khi trữ lượng địa chất tồn tại ở nhiều quốc gia, thì công suất tinh luyện và sản xuất vật liệu lại tập trung ở số ít trung tâm công nghiệp. Điều này khiến chuỗi cung ứng dễ tổn thương trước các cú sốc chính sách, thương mại hoặc môi trường. Việc mở mỏ mới cần thời gian dài (thăm dò – phê duyệt – xây dựng), còn mở rộng công suất chế biến đòi hỏi công nghệ cao và tuân thủ nghiêm ngặt ESG, nên phản ứng cung thường chậm hơn tăng trưởng cầu.

4.4. Biến động giá và rủi ro thị trường

Giá khoáng sản chiến lược thường biến động mạnh do cầu tăng nhanh, cung phản ứng chậm và tâm lý thị trường nhạy cảm với thông tin chính sách. Đối với REE, sự khác biệt giữa LREE và HREE thể hiện rõ: LREE có nguồn cung tương đối dồi dào hơn, còn HREE dễ thiếu hụt và biến động giá lớn. Biến động giá không chỉ ảnh hưởng đến chi phí sản xuất thiết bị năng lượng – công nghệ mà còn tác

động đến quyết định đầu tư, quy mô triển khai dự án và tiến độ chuyển dịch năng lượng ở nhiều quốc gia.

4.5. Tái cấu trúc chuỗi cung ứng và chiến lược đa dạng hóa

Trước rủi ro phụ thuộc nguồn cung, nhiều quốc gia và doanh nghiệp thúc đẩy đa dạng hóa địa lý, phát triển đối tác tin cậy, tăng dự trữ chiến lược và đầu tư năng lực chế biến trong nước. Cách tiếp cận mới nhấn mạnh không chỉ “có mỏ” mà phải “có công nghệ” và “có tiêu chuẩn”, đồng thời mở rộng hợp tác quốc tế về nghiên cứu phát triển (Research Development-R&D), chuyển giao công nghệ và đào tạo nhân lực.

4.6. Vai trò của tái chế và nguồn thứ cấp

Tái chế đang nổi lên như nguồn cung bổ trợ quan trọng để giảm áp lực khai thác sơ cấp. Các dòng chất thải như nam châm Nd-Fe-B thải, pin đã qua sử dụng, thiết bị điện tử hết vòng đời chứa hàm lượng REE và kim loại chiến lược đáng kể. Dù hiện nay tỷ lệ tái chế còn hạn chế do thách thức công nghệ và chi phí, nhưng trong trung – dài hạn, tái chế được kỳ vọng giúp ổn định cung – cầu, giảm phát thải và đáp ứng tiêu chuẩn ESG.

4.7. ESG và tác động đến cung – cầu

Tiêu chuẩn ESG ngày càng định hình thị trường khoáng sản chiến lược. Các dự án không đáp ứng yêu cầu môi trường – xã hội có nguy cơ bị loại khỏi chuỗi cung ứng của các tập đoàn công nghệ và năng lượng lớn. Điều này vừa tạo rào cản (tăng chi phí, kéo dài thời gian), vừa là động lực để nâng cấp công nghệ khai thác – chế biến sạch, minh bạch hóa nguồn gốc và truy xuất chuỗi giá trị.

4.8. Các chính sách trong bối cảnh cung – cầu toàn cầu

Bức tranh cung – cầu cho thấy khoáng sản chiến lược và đất hiếm sẽ tiếp tục là điểm nóng dài hạn của kinh tế thế giới. Các chính sách hiệu quả cần đồng thời: (i) bảo đảm nguồn cung ổn định; (ii) đầu tư công nghệ chế biến sâu; (iii) thúc đẩy tái chế; và (iv) tuân thủ ESG. Đối với các quốc gia có tiềm năng tài nguyên, việc

tham gia chuỗi cung ứng toàn cầu một cách bền vững phụ thuộc vào khả năng chuyển dịch từ khai thác thô sang chế biến – vật liệu, gắn với hợp tác quốc tế và quản trị môi trường hiện đại.

5. TIỀM NĂNG VIỆT NAM

5.1. Bối cảnh và ý nghĩa đối với Việt Nam

Việt Nam đang bước vào giai đoạn phát triển gắn với tăng trưởng xanh, chuyển đổi năng lượng và chuyển đổi số, kéo theo nhu cầu lớn về vật liệu cho điện gió–điện mặt trời, lưới điện, xe điện, điện tử và công nghiệp chế tạo. Trong bối cảnh chuỗi cung ứng khoáng sản chiến lược toàn cầu biến động, việc nhận diện và phát triển hợp lý các tài nguyên như đất hiếm, titan, vonfram, antimon, niken–coban (tiềm năng), graphit (tiềm năng)... có ý nghĩa quan trọng để:

- Tăng tự chủ nguyên liệu, giảm phụ thuộc nhập khẩu;
- Phát triển chuỗi giá trị trong nước (tuyển – chế biến sâu – vật liệu);
- Thu hút đầu tư công nghệ cao;
- Đảm bảo khai thác đi đôi với bảo vệ môi trường và an sinh xã hội.

5.2. Tiềm năng đất hiếm và khoáng sản chiến lược: các kiểu thành tạo chủ yếu

Về mặt địa chất – khoáng hóa, đất hiếm và nhiều khoáng sản chiến lược ở Việt Nam xuất hiện trong một số kiểu thành tạo điển hình, mỗi kiểu có ưu – nhược điểm khác nhau về quy mô, chất lượng quặng, mức độ phức tạp công nghệ và rủi ro môi trường.

(1) Đất hiếm gắn với đá magma kiềm – carbonatit và các thân quặng liên quan. Đây là kiểu thành tạo thường có tính tập trung khoáng hóa tốt hơn so với các nguồn phân tán. Quặng có thể chứa các khoáng vật đất hiếm như bastnäsite, monazite, xenotime... Tuy nhiên, đặc trưng phổ biến là quặng đa thành phần, nhiều tạp chất và có thể kèm Th/U, khiến khâu tuyển – tách – tinh luyện phức tạp và yêu cầu kiểm soát môi trường nghiêm ngặt.

(2) Đất hiếm trong thân quặng phong hóa (laterit/eluvi–deluvi): Quá trình phong hóa có thể làm giàu tương đối một số nguyên tố, tạo thân quặng gần mặt. Ưu điểm là dễ khai thác hơn về mặt cơ giới; nhược điểm là hàm lượng và tính đồng nhất biến đổi mạnh theo không gian, đòi hỏi điều tra chi tiết và công nghệ chế biến phù hợp để đạt hiệu quả kinh tế.

(3) Sa khoáng ven biển chứa monazite–xenotime (đi kèm khoáng vật titan): Dọc các dải cát ven biển, sa khoáng có thể chứa ilmenite–rutile–zircon và một phần khoáng vật đất hiếm (monazite, xenotime). Về chiến lược, đây là kiểu mỏ có ý nghĩa vì gắn với titan–zircon (cũng là khoáng sản quan trọng) và có thể thu hồi REE như sản phẩm đi kèm. Tuy nhiên, thách thức lớn là quản lý phóng xạ tự nhiên (nếu monazite cao) và tác động môi trường ven biển (xói lở, nước ngầm, hoàn nguyên).

5.3. Phân bố không gian: các vùng triển vọng chính

Trên quy mô cả nước, các biểu hiện đất hiếm và khoáng sản chiến lược tập trung theo các đới địa chất – kiến tạo và điều kiện địa mạo đặc thù:

Miền núi phía Bắc (Tây Bắc – Đông Bắc): triển vọng đất hiếm gắn với các phức hệ magma kiềm đặc biệt và các đới biến đổi; đồng thời là vùng có nhiều khoáng sản chiến lược khác (vonfram, thiếc, antimon, đồng, sắt...).

Dải ven biển miền Trung – Nam Trung Bộ: nổi bật về sa khoáng titan–zircon; khả năng thu hồi đất hiếm đi kèm (tùy thành phần monazite/xenotime).

Một số khu vực cao nguyên và vùng phong hóa mạnh: tiềm năng các thân quặng phong hóa chứa các nguyên tố chiến lược (cần đánh giá theo từng điều kiện địa chất cụ thể).

6. THÁCH THỨC

Mặc dù Việt Nam có tiềm năng đáng kể về khoáng sản chiến lược và đất hiếm, quá trình phát triển lĩnh vực này đang đối mặt với nhiều thách thức mang tính hệ thống, trải dài từ khoa học – công nghệ, môi trường – xã hội, thị trường –

kinh tế đến thể chế – nguồn nhân lực. Việc nhận diện đầy đủ các thách thức là điều kiện tiên quyết để xây dựng lộ trình phát triển hiệu quả, tránh khai thác không có hệ thống, quy chuẩn làm thất thoát tài nguyên và rủi ro môi trường.

6.1. Thách thức về điều tra, đánh giá và dữ liệu địa chất – công nghệ

Một trong những thách thức lớn nhất hiện nay là chất lượng và mức độ chi tiết của dữ liệu. Đối với khoáng sản chiến lược và đất hiếm, dữ liệu địa chất truyền thống (trữ lượng, hàm lượng trung bình) là chưa đủ; thay vào đó cần dữ liệu nghiên cứu về nguồn gốc, điều kiện thành tạo, quy luật phân bố, dạng tồn tại của nguyên tố và tính biến thiên theo thân quặng. Thiếu các thông tin này dẫn đến rủi ro lựa chọn công nghệ không phù hợp, hiệu quả thu hồi thấp và chi phí cao khi triển khai ở quy mô công nghiệp. Ngoài ra, việc thiếu mô hình hóa 3D–4D và đánh giá công nghệ chế biến ngay từ giai đoạn thăm dò làm tăng nguy cơ rủi ro trong việc đánh giá tài nguyên và khai thác – chế biến.

6.2. Thách thức công nghệ tuyển – tách – tinh luyện

Công nghệ là “nút thắt” cốt lõi của đất hiếm và nhiều khoáng sản chiến lược. Các nguyên tố đất hiếm có tính chất hóa học gần nhau, khiến quá trình tách chọn lọc đòi hỏi quy trình phức tạp, tiêu hao hóa chất và năng lượng. Với nhiều kiểu quặng ở Việt Nam, khoáng vật đất hiếm tồn tại ở dạng đa khoáng, hạt mịn, phân bố không đồng đều, làm giảm hiệu suất tuyển và tăng chi phí tinh luyện. Bên cạnh đó, việc đạt độ tinh khiết cao để sản xuất oxit, kim loại hay hợp kim đạt chuẩn quốc tế là thách thức lớn, do yêu cầu kiểm soát chặt chẽ tạp chất (kể cả Th/U đi kèm trong một số loại quặng).

6.3. Thách thức môi trường và quản lý chất thải

Khai thác và chế biến khoáng sản chiến lược, đặc biệt là đất hiếm, tiềm ẩn rủi ro môi trường đáng kể nếu không kiểm soát tốt. Các vấn đề chính bao gồm: nước thải giàu ion kim loại và hóa chất; bùn thải tuyển – thủy luyện; phát thải bụi; và nguy cơ phóng xạ tự nhiên từ khoáng vật monazite/xenotime. Đối với sa khoáng

ven biển, thách thức còn mở rộng sang xói lở bờ biển, suy giảm nước ngầm và phục hồi cảnh quan. Việc đáp ứng các tiêu chuẩn môi trường ngày càng nghiêm ngặt làm tăng chi phí đầu tư ban đầu, nhưng nếu không tuân thủ sẽ khiến dự án khó tiếp cận thị trường quốc tế.

6.4. Thách thức kinh tế và biến động thị trường

Thị trường khoáng sản chiến lược và đất hiếm có biến động giá mạnh, chịu ảnh hưởng của chính sách, địa chính trị và chu kỳ công nghệ. Đối với các dự án trong nước, biến động giá có thể làm thay đổi hoàn toàn tính khả thi kinh tế, đặc biệt khi chi phí đầu tư công nghệ cao và thời gian hoàn vốn dài. Bên cạnh đó, quy mô mỏ ở nhiều khu vực chưa đủ lớn để đạt lợi thế kinh tế theo quy mô, trong khi việc liên kết nhiều mỏ hoặc nhiều khâu trong chuỗi giá trị còn hạn chế. Điều này đòi hỏi các mô hình đầu tư linh hoạt, có kịch bản giá và chiến lược thị trường dài hạn.

6.5. Thách thức về chuỗi giá trị và liên kết công nghiệp

Hiện nay, chuỗi giá trị khoáng sản chiến lược ở Việt Nam còn đứt đoạn, chủ yếu tập trung ở khâu khai thác và sơ chế. Việc thiếu liên kết giữa mỏ – nhà máy chế biến – doanh nghiệp vật liệu – ngành sử dụng cuối khiến giá trị gia tăng thấp và phụ thuộc lớn vào thị trường bên ngoài. Trong khi đó, các khâu tạo giá trị cao nhất (vật liệu từ tính, hợp kim, linh kiện) đòi hỏi công nghệ, tiêu chuẩn chất lượng và vốn đầu tư mà doanh nghiệp trong nước còn hạn chế. Không hình thành được chuỗi giá trị nội địa sẽ làm giảm khả năng tận dụng lợi thế tài nguyên.

6.6. Thách thức về thể chế, chính sách và quản trị

Phát triển khoáng sản chiến lược và đất hiếm đòi hỏi khung chính sách ổn định, dài hạn và nhất quán. Tuy nhiên, thực tế cho thấy vẫn tồn tại những bất cập trong phối hợp giữa quản lý tài nguyên, môi trường, đầu tư và khoa học – công nghệ. Thủ tục cấp phép kéo dài, cơ chế khuyến khích đầu tư chế biến sâu chưa đủ mạnh, và thiếu các chính sách đặc thù cho R&D và thí điểm công nghệ là những

rào cản đáng kể. Ngoài ra, việc tích hợp tiêu chuẩn ESG vào khung pháp lý và thực thi còn cần tiếp tục hoàn thiện.

6.7. Thách thức về nguồn nhân lực và năng lực nghiên cứu

Nguồn nhân lực chất lượng cao cho lĩnh vực đất hiếm và khoáng sản chiến lược còn thiếu, đặc biệt ở các mảng khoáng vật học ứng dụng, tuyển – thủy luyện, vật liệu từ tính, quản lý môi trường mỏ và đánh giá vòng đời sản phẩm. Năng lực nghiên cứu – phát triển trong nước đang được cải thiện nhưng chưa đồng đều; việc kết nối giữa viện nghiên cứu, trường đại học và doanh nghiệp còn hạn chế. Điều này làm chậm quá trình nội địa hóa công nghệ và giảm khả năng tiếp nhận chuyển giao công nghệ tiên tiến.

6.8. Định hướng phát triển bền vững

Các thách thức nêu trên cho thấy phát triển khoáng sản chiến lược và đất hiếm không thể tiếp cận theo hướng khai thác ngắn hạn, mà cần chiến lược tổng hợp, dài hạn. Giải quyết thách thức đòi hỏi đầu tư đồng thời vào dữ liệu khoa học, công nghệ chế biến sạch, quản trị môi trường – xã hội, chính sách khuyến khích và đào tạo nguồn nhân lực.

7. ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN

Trước bối cảnh nhu cầu khoáng sản chiến lược và đất hiếm gia tăng nhanh chóng cùng với các thách thức về công nghệ, môi trường và thị trường đã nêu ở Mục 6, việc xây dựng định hướng nghiên cứu và phát triển mang tính hệ thống, dài hạn và gắn với chuỗi giá trị là yêu cầu cấp thiết đối với Việt Nam. Định hướng này cần bảo đảm mục tiêu làm chủ tri thức – công nghệ cốt lõi, nâng cao giá trị gia tăng trong nước, đồng thời đáp ứng các tiêu chuẩn phát triển bền vững và hội nhập quốc tế.

7.1. Định hướng nghiên cứu cơ bản và điều tra địa chất chuyên sâu

Nghiên cứu cơ bản tiếp tục đóng vai trò nền tảng trong phát triển khoáng sản chiến lược và đất hiếm. Trọng tâm trong giai đoạn tới là:

Hoàn thiện mô hình sinh khoáng đối với các kiểu thành tạo đất hiếm và khoáng sản chiến lược đặc trưng ở Việt Nam, làm rõ mối liên hệ giữa bối cảnh kiến tạo – magma – quá trình phong hóa với sự tập trung khoáng hóa.

Nâng cao chất lượng điều tra – đánh giá tài nguyên theo hướng tích hợp địa chất, địa vật lý, địa hóa, khoáng vật học và mô hình hóa 3D–4D, từ đó có cơ sở đánh giá về trữ lượng và chất lượng quặng được chính xác và tin cậy hơn.

Nghiên cứu đặc trưng khoáng vật học – công nghệ ngay từ giai đoạn thăm dò, xác định dạng tồn tại của các nguyên tố chiến lược, mức độ phân bố vi mô và tính biến đổi theo thân quặng, nhằm lựa chọn giải pháp khai thác – chế biến phù hợp.

7.2. Định hướng phát triển công nghệ tuyển – tách – tinh luyện

Công nghệ chế biến sâu là yếu tố quyết định khả năng chuyển hóa tài nguyên thành giá trị kinh tế – công nghệ. Định hướng ưu tiên bao gồm:

Nghiên cứu và hoàn thiện các quy trình tuyển khoáng chọn lọc, phù hợp với từng kiểu quặng (nguyên sinh, phong hóa, sa khoáng), nhằm nâng cao hiệu suất thu hồi và giảm tiêu hao tài nguyên.

Phát triển công nghệ tách – tinh luyện đất hiếm và kim loại chiến lược theo hướng tiết kiệm hóa chất, năng lượng và thân thiện môi trường; chú trọng các giải pháp tách chọn lọc đất hiếm nặng (HREE).

Đầu tư xây dựng dây chuyền thí điểm để kiểm chứng và tối ưu hóa quy trình trước khi mở rộng quy mô công nghiệp, giảm rủi ro kỹ thuật và tài chính.

Tăng cường nghiên cứu kiểm soát và xử lý tạp chất, phóng xạ tự nhiên đi kèm, bảo đảm an toàn môi trường và tuân thủ tiêu chuẩn quốc tế.

7.3. Định hướng phát triển vật liệu và sản phẩm giá trị gia tăng cao

Đề thoát khỏi mô hình khai thác – xuất khẩu thô, cần chuyển trọng tâm nghiên cứu và Phát triển sang các khâu tạo giá trị cao trong chuỗi:

BẢN TIN KHOA HỌC – KHOÁNG SẢN CHIẾN LƯỢC VÀ ĐẤT HIẾM

Nghiên cứu sản xuất oxit, kim loại và hợp kim đất hiếm đạt độ tinh khiết cao, đáp ứng yêu cầu làm đầu vào cho công nghiệp vật liệu.

Phát triển vật liệu từ tính, vật liệu chức năng và hợp kim đặc chủng, phục vụ các lĩnh vực như năng lượng tái tạo, giao thông điện hóa, điện tử và cơ khí chính xác.

Tăng cường hợp tác với doanh nghiệp trong và ngoài nước để kết nối nghiên cứu – sản xuất – thị trường, bảo đảm sản phẩm nghiên cứu và Phát triển có khả năng thương mại hóa.

7.4. Định hướng nghiên cứu môi trường và kinh tế tuần hoàn

Phát triển khoáng sản chiến lược và đất hiếm phải gắn chặt với mục tiêu bền vững. Các hướng nghiên cứu ưu tiên gồm:

Hoàn thiện các giải pháp quản lý chất thải mỏ, tuần hoàn nước, giảm phát thải và phục hồi môi trường sau khai thác.

Nghiên cứu và triển khai tái chế đất hiếm và kim loại chiến lược từ chất thải công nghiệp, thiết bị điện tử và pin đã qua sử dụng, coi đây là nguồn tài nguyên thứ cấp quan trọng.

Xây dựng bộ chỉ tiêu và quy trình đánh giá ESG phù hợp với điều kiện Việt Nam, làm cơ sở cho quản lý nhà nước và tiếp cận thị trường quốc tế.

7.5. Định hướng phát triển chuỗi giá trị và liên kết công nghiệp

Nghiên cứu và phát triển cần được đặt trong tổng thể chuỗi giá trị:

Đề xuất mô hình liên kết mỏ – nhà máy chế biến – doanh nghiệp vật liệu – ngành sử dụng cuối, bảo đảm đầu ra ổn định và hiệu quả kinh tế.

Xây dựng các cụm công nghiệp – nghiên cứu chuyên sâu về khoáng sản chiến lược và đất hiếm, gắn với hạ tầng logistics và khu công nghiệp hiện có.

Phân tích thị trường và kịch bản giá để hỗ trợ ra quyết định đầu tư dài hạn, giảm rủi ro trước biến động toàn cầu.

7.6. Định hướng hợp tác quốc tế và chuyển giao công nghệ

BẢN TIN KHOA HỌC – KHOÁNG SẢN CHIẾN LƯỢC VÀ ĐẤT HIẾM

Hợp tác quốc tế là kênh quan trọng để rút ngắn khoảng cách công nghệ:

Mở rộng hợp tác với các trung tâm nghiên cứu, trường đại học và doanh nghiệp có thế mạnh về đất hiếm và vật liệu tiên tiến.

Tập trung vào chuyển giao công nghệ chế biến sâu, đào tạo nhân lực và nghiên cứu chung, thay vì chỉ dừng ở hợp tác khai thác tài nguyên.

Tham gia các mạng lưới và sáng kiến quốc tế về khoáng sản chiến lược, ESG và an ninh chuỗi cung ứng.

7.7. Định hướng phát triển nguồn nhân lực và năng lực nghiên cứu

Nguồn nhân lực chất lượng cao là điều kiện tiên quyết để hiện thực hóa các định hướng trên. Cần:

Đào tạo, bồi dưỡng chuyên sâu các lĩnh vực khoáng vật học ứng dụng, tuyển – thủy luyện, vật liệu và quản lý môi trường mỏ.

Tăng cường liên kết viện nghiên cứu – trường đại học – doanh nghiệp trong đào tạo và nghiên cứu ứng dụng.

Đầu tư nâng cấp phòng thí nghiệm, trang thiết bị phân tích hiện đại để hỗ trợ nghiên cứu liên ngành.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22 tháng 12 năm 2024 về đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia. Hà Nội.
2. Nghị quyết số 71/NQ-CP ban hành Chương trình hành động của Chính phủ thực hiện Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22 tháng 12 năm 2024 của Bộ Chính trị về đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia. Hà Nội.
3. Quyết định số 2401/QĐ-BTNMT ngày 27 tháng 6 năm 2025 ban hành Kế hoạch của Bộ Nông nghiệp và Môi trường thực hiện Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22 tháng 12 năm 2024 của Bộ Chính trị về đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia. Hà Nội.

4. Quyết định số 1131/QĐ-TTg ngày 12 tháng 6 năm 2025 ban hành Danh mục công nghệ chiến lược và sản phẩm công nghệ chiến lược. Hà Nội.
5. International Energy Agency (IEA) (2023). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA.
6. European Commission (2023). Critical Raw Materials Act and Strategic Materials List. Brussels.
7. United States Geological Survey (USGS) (2024). Mineral Commodity Summaries: Rare Earths, Lithium, Cobalt, Nickel, Graphite. Reston, VA.
8. World Bank (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Washington, DC.
9. OECD (2022). Global Material Resources Outlook to 2060. Paris: OECD Publishing.
11. Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2018). The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research*, 27, 201–216.
12. Dostal, J. (2017). Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks. *Resources*, 6(3), 34.
13. Chakhmouradian, A. R., & Zaitsev, A. N. (2012). Rare earth mineralization in igneous rocks: Sources and processes. *Elements*, 8, 347–353.
14. Haxel, G. B., Hedrick, J. B., & Orris, G. J. (2002). Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology. USGS Fact Sheet 087-02.
15. Humphries, M. (2021). Rare Earth Elements: The Global Supply Chain. Congressional Research Service, USA.
16. Mancheri, N. A., et al. (2019). Resilience in the rare earth supply chain. *Resources Policy*, 60, 366–375.
17. Hund, K., et al. (2023). Critical Minerals Market Review. World Bank Group.
18. British Geological Survey (BGS) (2023). Critical Raw Materials Risk List. Nottingham, UK.
19. Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2005). Extractive Metallurgy of Rare Earths. CRC Press.

20. Abaka-Wood, G. B., et al. (2022). Advances in rare earth elements separation and purification technologies. *Hydrometallurgy*, 210, 105847.
21. Yang, Y., & Walton, A. (2019). Recycling of rare earths from permanent magnets. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5, 122–136.
22. Massari, S., & Ruberti, M. (2013). Rare earth elements as critical raw materials. *Resources Policy*, 38, 36–43.
23. Ali, S. H., et al. (2017). Mineral supply for sustainable development. *Science*, 358(6362), 243–246.
24. UNEP (2020). *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies*. Nairobi.
25. European Environment Agency (EEA) (2022). *Circular Economy and Raw Materials in Europe*. Copenhagen.
26. Jowitt, S. M., et al. (2018). Future availability of mineral resources. *Geochemical Perspectives*, 7, 1–70.