

제4차 원자력안전규제의 미래 워크숍

일시: 2025년 12월 19일 오전 9:00 - 오후 5:30

장소: 서울대학교 39동 BI BK다목적홀

주최: 원자력미래기술정책연구소 원자력정책센터, 원자핵공학과, 비즈(주)



제4차

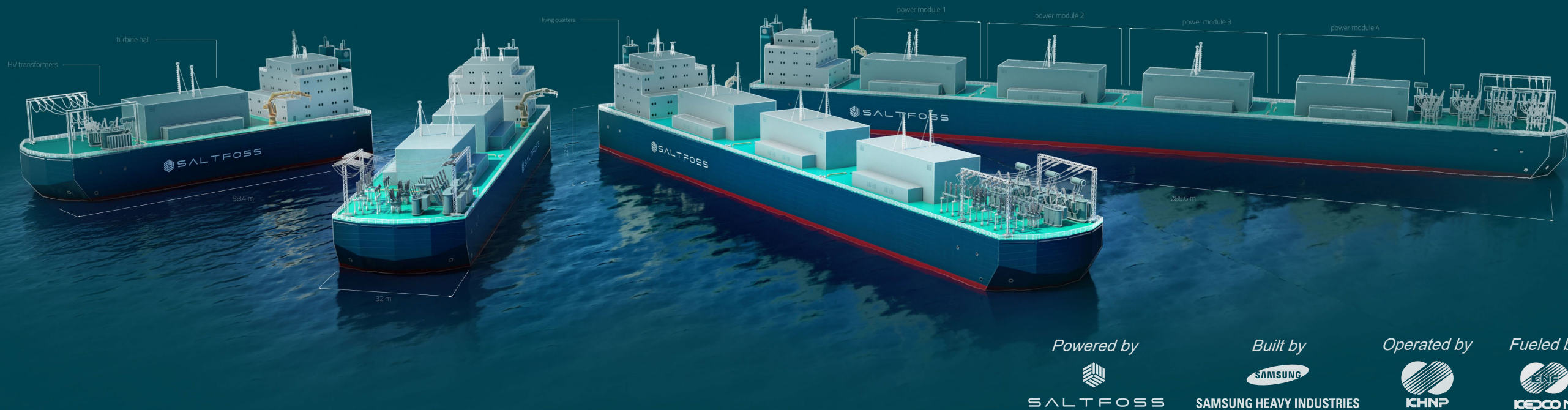
원자력안전규제의 미래 워크숍

LESSONS LEARNED FROM NUSCALE DESIGN APPROVAL

Nadja Joergensen

2025.12.19 (금)





LESSONS LEARNED FROM NUSCALE DESIGN APPROVAL

DECEMBER 2025

INTRODUCTION

BACKGROUND

- B.S. in mechanical and nuclear engineering at Kansas State University
- Operating plant experience
- Gen III+ & Advanced reactor experience



DISCLAIMER

The views and opinions expressed in this presentation are solely my own and do not reflect those of NuScale or any affiliated organization. All information presented is drawn from publicly available sources and represents my own analysis and interpretation. This presentation should not be regarded as an official statement or position of NuScale.

AGENDA

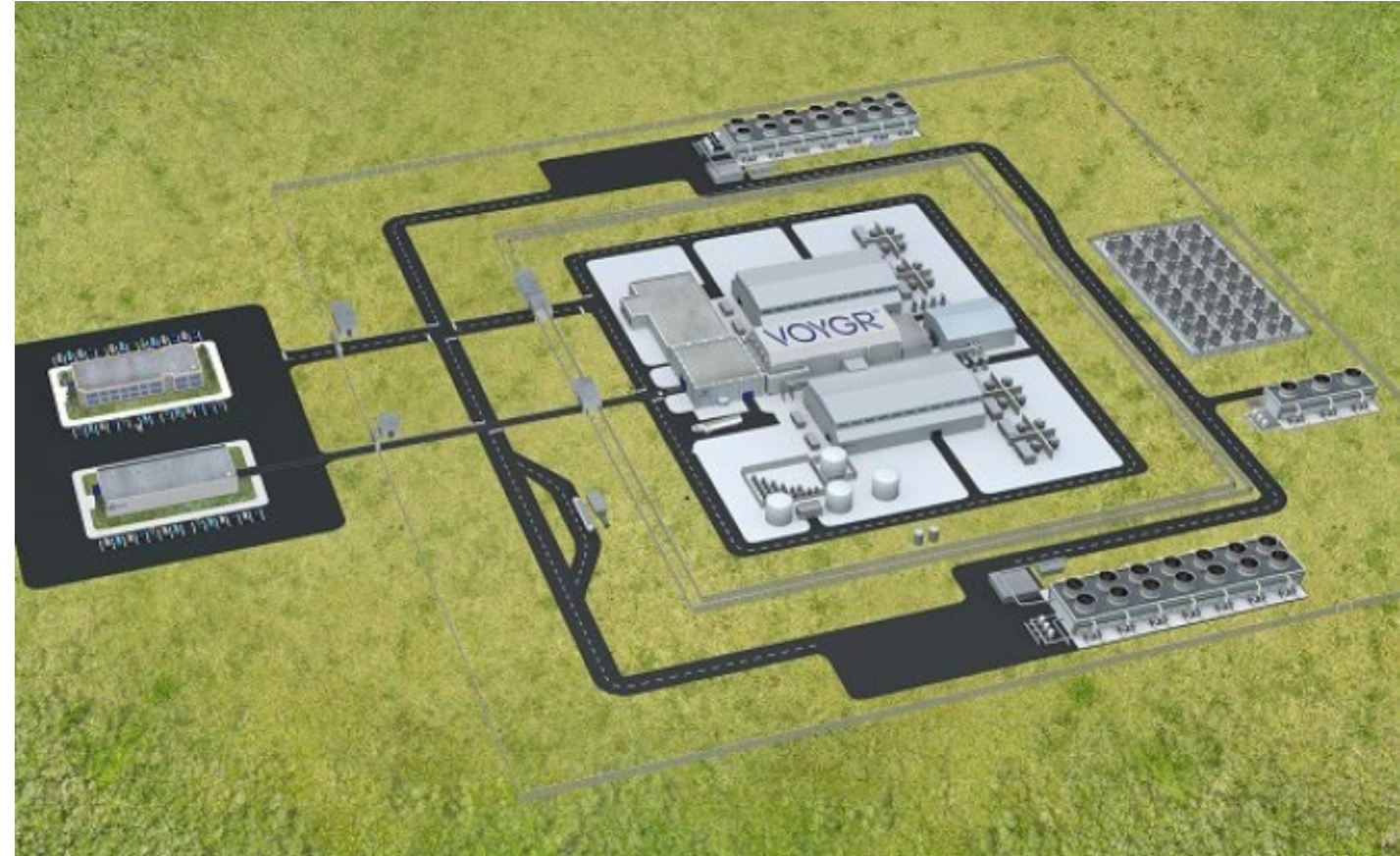
- 1| Introduction to NuScale
- 2| NuScale lessons learned
- 3| NRC Staff lessons learned
- 4| Application of lessons learned to advanced reactors

SETTING THE STAGE

COMPANY FACTS

- Company established in 2007
- Developed NuScale VOYGR SMR Power Plants

“A fully factory fabricated small modular reactor (SMR) comprised of an integral nuclear steam supply system in which the reactor core, steam generators and pressurizer are all contained in a single vessel”



SETTING THE STAGE

PLANT FEATURES

- The plant features a 77 MWe NuScale power module
- Each plant can add up to 12 modules (924 MWe)
- Light water reactor using existing fuel type
- 60-year lifetime
- Site boundary emergency planning zone (EPZ)
- Operator staffing- 2 senior reactor operators, 1 reactor operator



SETTING THE STAGE

LICENSING

- Began pre-application in 2008
- Submitted design certification application in December 2016
- Received NRC approval of final safety evaluation report and Standard Design Approval (SDA) for in 2020, final rule published in August 2022.
- Submitted SDA application for updated NPM (77MWe) in December 2022
- Received NRC approval of SDA in May 2025

NuScale DCA Statistics

- 12,000+ pages
- 14 Topical Reports
- 2 million labour hours
- 800 people
- 50 supplier/partners
- Over \$500M

PRE-APPLICATION

LESSONS LEARNED

- NuScale started the engagement process in 2008 and continued thru September 2016
- The early engagement provided limited value
 - Submitted 7 technical reports, 12 white paper, gap analyses
 - Limited, informal feedback
 - NRC management was minimally involved which limited commitments to resolve technical and policy issues
- Engagement closer to submittal
 - Much more valuable
 - Began receiving formal feedback
 - Design specific review standards were issued
 - Increased participation of NRC management
 - Training provided to NRC application reviewers

PRE-APPLICATION

LESSONS LEARNED

Recommended actions based on NuScale's experience:

- Design-specific review standard should be issued earlier – 18 months to two years prior to submittal
- NRC should formally address key safety features early
 - ❑ NRC Staff should review and comment on white papers, technical reports, and gap analysis
- Earlier and increased participation by management
 - ❑ better ability to make lasting commitments for NRC

DESIGN CERTIFICATION APPLICATION REVIEW

LESSONS LEARNED

- NuScale concluded* the DCA review as a successful demonstration of the NRC's ability to review an advanced reactor design in a reasonable timeframe.
- However, they also concluded that the review process needs to and can continue to be made more efficient and predictable, reducing the substantial burden on applicants and the NRC while enhancing focus on matters important to safety.
- NuScale identified some major challenges for efficient and timely review of a new reactor design, and those that were of utmost concern for the NRC's attention prior to their future submittal of an SDA application.
- The challenges were from their perspective as a light-water SMR applicant seeking design certification

*ML21050A431

DESIGN CERTIFICATION APPLICATION REVIEW

LESSONS LEARNED

- Establish an appeal process to resolve disagreements between applicants and the NRC staff with respect to preliminary interpretations of requirements and guidance.
- Specifically, where an applicant believes that Staff are misconstruing regulatory requirements, changing position on meeting requirements, or erroneously concluding the design fails to meet acceptance criteria, an applicant and Staff should be able to present their positions to a neutral arbiter to render a decision.
- The consequence of the absence of such a process is that regulatory burden has steadily increased from one applicant to the next without consideration of whether new staff positions have merit from a safety perspective.

DESIGN CERTIFICATION APPLICATION REVIEW

LESSONS LEARNED

- Rely on downstream requirements and programs to supplement design detail and test data as part of NRC safety findings.
- Downstream programs include programs required by regulation; e.g., Appendix B quality assurance, the ASME Code, and ITAAC.
- The consequence of not relying on these required programs is increased cost and time to develop applications and obtain approval, without improving the safety of the constructed facility.
- In the case of the NuScale DCA, application development and review costs exceeded half a billion dollars.

DESIGN CERTIFICATION APPLICATION REVIEW

LESSONS LEARNED

- Clarify the role of the Advisory Committee on Reactor Safeguards (ACRS).
- The ACRS's approach during the NuScale DCA review worked because the NuScale SMR was the only advanced reactor design under review. However, it was unnecessarily broad and burdensome, and the same approach may not work if there are multiple advanced reactor designs under review, as expected in the future.
- The consequence of not clarifying the role of the ACRS is that the ACRS, due to resource constraints, may delay the approval and deployment of nuclear power plants with advanced safety features.
- In the DCA, the ACRS conducted 40 meetings totalling approximately 440 hours.

NRC STAFF LESSONS LEARNED

BEST PRACTICES

NRC staff issued lessons learned from the NuScale design certification application in 2022 (ML22088A161)

- NuScale voluntarily engaged in preapplication activities to familiarize the staff with the design based on its development to that point. These activities improved the NRC staff's understanding of the main attributes of the design and allowed for resolution of some key areas before DCA submittal.
- The NRC staff emphasized the need for continuity of the technical, project, and legal reviewers on the NuScale DCA to the maximum extent possible. This promotes a more reliable, clear, and efficient review. The NRC should explore ways to increase the stability of its review teams and collect data in future reviews to assess its performance in this area.
- NuScale issued a regulatory gap analysis letter during preapplication activities to identify unique areas of the design that deviate from traditional compliance approaches. This initiative provided early engagement in nontraditional areas of the design. The staff's white paper encourages this type of preapplication exchange because it allows the staff to communicate early regulatory perspectives before receipt of an application.
- NuScale used topical reports for novel design features and approaches to allow the staff to generically review and approve such features. This increased NRC and NuScale attention on these review areas to facilitate more timely resolution.
- The NRC and NuScale conducted NRC staff audits in areas involving FOAK design features, or review areas where the design was evolving, and used NuScale's electronic reading room as an efficient means to resolve highly technical issues. The NRC and NuScale gained valuable insights into the most efficient way to conduct audits over the course of the review. These insights should be captured and incorporated into audits for future applications.
- The NRC and NuScale developed a list of highly challenging issues (HCIs) that, by focusing on these topics, led to their more timely and efficient resolution.
- The NRC developed risk-informed approaches in a number of areas during the NuScale review that facilitated reaching safety determinations. The use of risk insights during the preapplication period and at the beginning of reviews helped the staff assess the risk significance of design attributes and thereby apply resources in a more efficient and reliable manner.

NRC STAFF LESSONS LEARNED

LESSONS LEARNED

While the NRC staff and NuScale had many significant accomplishments and best practices that supported timely completion of the review, they encountered challenges that adversely impacted the efficiency, reliability, and clarity of the review.

- Design finalization at application and changes during licensing
- Application of a holistic, risk informed review strategy
- Enhancements to the RAI and audit process
- Establishment and management of review schedule and resource estimates

NRC STAFF LESSONS LEARNED

LESSONS LEARNED

Design finalization at application and changes during licensing

Context: When NuScale submitted the DCA in 2016, they had not performed or completed important testing, analyses, or engineering evaluations to demonstrate the reliability of some safety-significant FOAK design features or structures, systems, and components.

Impact: During the review, testing resulted in numerous changes in the design and additional analysis to demonstrate adequate performance of an SSC. The changes and associated review resulted in substantial unanticipated resource and time expenditures for both NRC and NuScale.

Mitigation:

- Robust pre-application engagement to discuss design status
- Applicant should identify all design aspects that are still undergoing finalization, testing, or analysis or that are otherwise, subject to change, especially if these deviate from discussions between the applicant and the NRC during preapplication meetings.
- NRC should carefully evaluate the list provided by the applicant to ensure schedules and resources are appropriately allocated.
- NRC should conduct early assessment of the potential risk significance of these areas and discuss with the applicant any potential impacts on schedules or resources.

NRC STAFF LESSONS LEARNED

LESSONS LEARNED

Application of a holistic, risk informed review strategy

Context: While the NRC made substantial progress in conducting a risk-informed review of the NuScale application, opportunities remain to further enhance its ability to apply risk-informed principles during the review of new and advanced reactors.

Impact:

The NRC staff and NuScale spent considerable effort aligning on the risk information provided in the application. This occurred in parallel with the ongoing safety review in other areas of the application. This reduced the ability to incorporate insights from the risk information into other portions of the review. Additionally, because the NRC conducted the review in a matrixed manner (i.e., work was distributed to divisions and branches to conduct their focused review) and not in an integrated holistic manner, risk insights were less effectively incorporated into specific review areas. Reviewers were not always aware of the risk significance of their review in the context of the overall design. This contributed to increased focus and effort in some areas that may not have been commensurate with their risk significance.

New and advanced reactor designs will employ novel and integrated passive and inherent features to demonstrate safety. Correspondingly, the NRC must adapt its review strategy to ensure integrated safety and environmental reviews from the beginning.

Mitigation:

- At the beginning of a licensing review, and potentially during preapplication, the applicant should prepare and present to the NRC staff its approach to performing its risk assessment and the key conclusions.
- For new and advanced reactor reviews, the NRC should establish an interdisciplinary review team at the preapplication engagement phase to identify any cross-cutting technical and regulatory issues, assess their risk significance, and ensure that the staff performs its review of a unique new reactor design in an integrated manner. This focused team should be smaller and more flexible than the matrixed team used in the NuScale and prior new reactor application reviews. The team should include NRC subject matter technical experts from review areas related to the novel and risk-significant features in the design.

NRC STAFF LESSONS LEARNED

LESSONS LEARNED

Enhancements to the RAI and audit process

Context:

While the NRC staff and NuScale saw improvements in the use of RAIs and audits, continuous improvement is necessary to enhance clarity and reliability, as these tools will continue to be a critical component to ensure the docketing of key safety and technical information necessary to support the staff's reasonable assurance findings.

The NRC and NuScale leveraged audits with varying degrees of success during the review, when it became apparent that the audits helped the staff understand key design attributes and focus on the information the applicant needed to supply on the docket to support safety findings.

Impact:

- NRC did not implement a reasonably consistent approach for the establishment and conduct of audits.
- During the NuScale review, the NRC was performing a revision to the RAI process focusing on regulatory requirements, safety significance, and clarity of RAIs. As such, the NuScale review did not benefit from the enhancements. An example of impact would be RAIs were issued when an audit could have been more beneficial to assess whether an RAI was actually necessary.

Mitigation:

- Applicants should review NRC RAIs and audit plans to assess whether the key attributes described above are included. Applicants should promptly raise any concerns and request clarification calls as necessary. Applicants should meet commitments for RAI responses and communicate any anticipated delays early. Applicants should acknowledge the impact of delays on the review schedule and resources.
- To conduct a timely and resource-focused safety review, RAI development must be complemented effectively by an applicant's responsiveness to RAIs.
- The NRC should devote additional attention to ensuring that RAIs and audits conform to NRC guidance and assessing whether there are more effective means to gather the information, thereby maximizing the efficiency of the use of these tools to gather only the information necessary to reach a reasonable assurance determination.

NRC STAFF LESSONS LEARNED

LESSONS LEARNED

Establishment and management of review schedule and resource estimates

Context:

- At the beginning of the NuScale review, the NRC staff established a 42-month review schedule but did not provide NuScale with a resource estimate for the review. As the NRC developed its internal resource estimates, it is not evident that the agency could clearly tie the resource allocations to the risk or safety significance of those design aspects of the review.
- The NRC's system for tracking project completion did not integrate the status of the project closely with the resources being expended, especially in discrete technical disciplines.
- As such, the NRC lacked an effective real-time mechanism to link expenditures with risk significance and project completion. This circumstance led to exceeding internal estimates without proper early identification and engagement.

Impact:

The NRC staff recognized this challenge during the review. As an interim corrective action, the staff developed detailed resource estimates for the completion of the final phases of the review. Leveraging the best information available from the project management software, NRC management and staff manually assessed resource expenditures biweekly over these remaining phases. To support effective cost management, as areas of the review were completed, the NRC staff closed the associated charge codes to avoid inadvertent costs to NuScale. Despite late design changes incorporated by NuScale, the NRC was able to complete its review within the established schedule and resource estimates it had developed.

Mitigation:

- This significant NRC challenge reflects the need for better scheduling and cost accounting methodologies.
- Led to NRC improving its ability to develop more challenging schedules and resource estimates without compromising safety.
- This includes better software for project management and resource expenditures based on data analytics and enhanced reporting capabilities for real-time tracking and monitoring by the staff and management. The staff has developed internal dashboards that provide the status of HCIs, track performance against schedules and resource estimates, and allow detailed assessments of areas of potential challenges.

APPLICATION OF LESSONS LEARNED TO ADVANCED REACTORS

CURRENT STATUS

- As noted in the draft operational plan for the pre-design review for new SMRs proposed by NSSC in September 2025, *SMRs are being developed rapidly and in diverse designs making it difficult to conduct safety reviews under current regulatory framework.*
- *There is a growing need for pre-design review to identify safety issues of new reactor types at an early stage and to prepare appropriate safety review processes.*
- The draft operational plan and draft regulatory framework for advanced reactors proposed by NS S C in September 2025 are the first steps for licensing of advanced reactors in Korea

APPLICATION OF LESSONS LEARNED TO ADVANCED REACTORS

WHAT IS NEEDED

- Advanced reactor vendors with target deployment dates in 2030s cannot wait for a new advanced reactor framework and associated reactor-specific technical standards to be developed
 - Currently recognized in Korea and steps are already being taken
- Using existing framework, proposing General Design Criteria, and seeking exemptions for when specific requirements are not applicable seems to be most appropriate path forward for near-term advanced reactor licensing
 - NSSC has agreed to this approach
 - Allowance for choosing applicable/appropriate technical standards

APPLICATION OF LESSONS LEARNED TO ADVANCED REACTORS

WHAT IS NEEDED

- Concise and deliberate pre-application is imperative
- Early training and participation of regulatory management and staff
 - Reactor type familiarization training
 - Vendor technology familiarization training
 - Identification of review staff to ensure proper knowledge and expertise for review

APPLICATION OF LESSONS LEARNED TO ADVANCED REACTORS

WHAT IS NEEDED

- Agreement on administrative topics and timelines as soon as early
 - Types of engagements (meetings, audits)
 - Process for feedback and request for additional information
 - Resource allocation
 - Timeline for review process
- Early formal feedback and resolution on review approach for key novel design features and methodologies
 - Review and feedback of white papers, technical, and topical reports
 - Formal documented feedback that can be used during the licensing application process

APPLICATION OF LESSONS LEARNED TO ADVANCED REACTORS

WHAT IS NEEDED

- Use regulatory precedent from the on-going licensing of advanced reactors
 - Draft regulation, regulatory guides exist
 - Kairos, Terrapower, X-energy currently being licensed in the U.S.
- Implementation of prescriptive with risk informed insights
 - Allowance for using aspects of U.S. NRC 10 CFR Part 53 to implement risk informed insights as mentioned in draft regulatory framework for advanced reactors



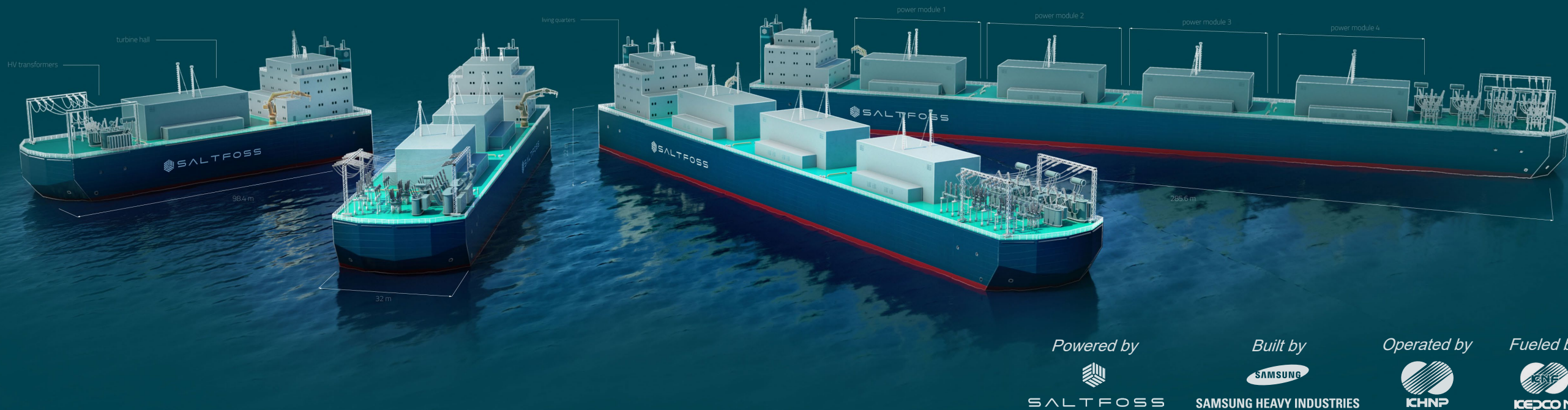
감사합니다

Tak

Thank you

www.saltfoss.com





SALTFOSS

FLOATING NUCLEAR POWER BARGES

DECEMBER 2025

AGENDA

1| Introduction to Saltfoss

2| Consortium

3| The licensing case

4| Achievements and road to deployment

INTRODUCTION TO SALTFOSS

SALTFOSS VALUE PROPOSITION



The case of today's nuclear power plants

While all nuclear power plants represent a source of low carbon energy, major issues plaguing today's conventional land-based LWR (light water reactor):

- Construction time and infrastructure with associated high costs of financing.
- Highly site-specific engineering and construction projects.
- High costs of nuclear licensing due to non-standardized designs.
- Very severe consequences of worst-case nuclear accident resulting in public acceptance issues, large emergency planning zones and public evacuation plans with significant nuclear liability considerations and costs.

Saltfoss' value proposition

Saltfoss Energy is developing a novel type of nuclear technology – the **seaMSR Power Barge** – that aims to revolutionize the way we think about nuclear power:

- New reactor technology (molten salt reactor) leading to **radically different safety case**.
- **Turnkey energy solution** delivered through maritime route from construction at shipyard (3 years from order to delivery)
- **Fully centralized and standardized** design and construction – high quality and safety.
- Leveraging **Korean expertise and capabilities** in nuclear and offshore.

INTRODUCTION TO SALTFOSS

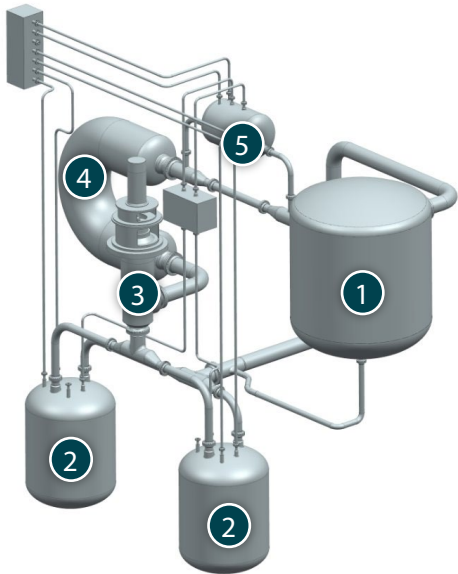
SeaMSR-100: A LOOP TYPE REACTOR

The seaMSR-100

The seaMSR-100 design basis is “No in-situ handling of irradiated fuel.”

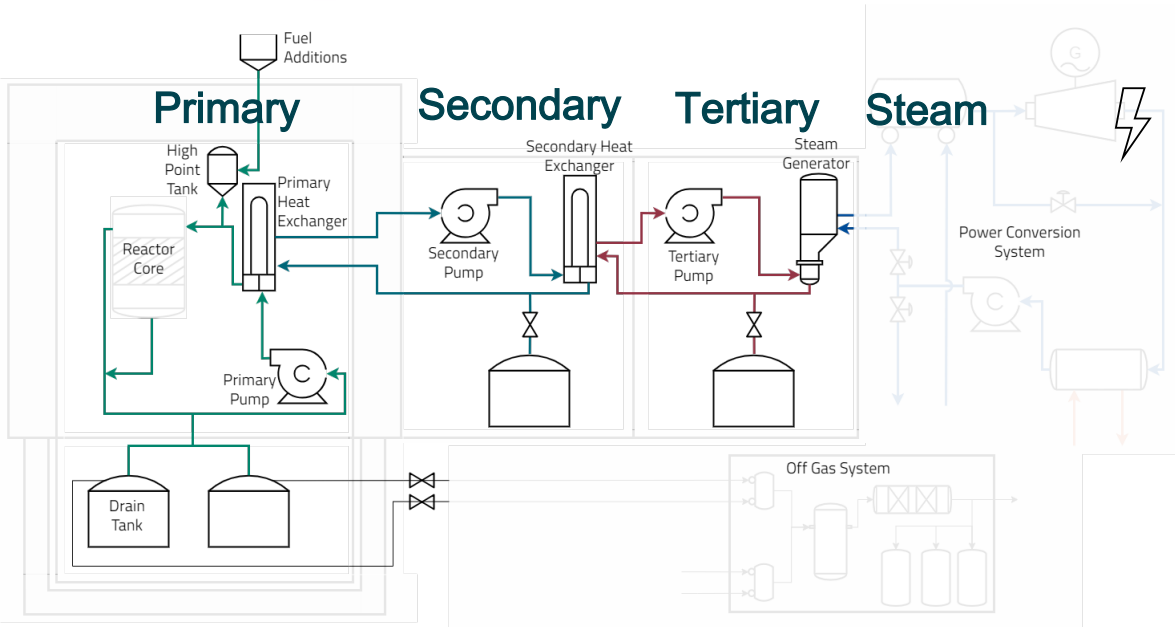
The loop type reactor design is enabling design, co-development, manufacturing, and testing of individual component, minimising integral effects.

Key characteristics	Value
Design status	Basic
Design Lifetime	24 years
Nominal power	250 MW _t / 100 MW _e
Neutron spectrum	Thermal
Fuel enrichment	Low -enriched uranium
Fuel salt	Fluoride (FUNaK)
Initial enrichment	≈ 2%
Refueling method / enrichment	Online addition / ≈ 5%
Moderator	Graphite
Fuel salt solidification / boiling point	≈ 500 °C / ≈ 1.500 °C
Core inlet / outlet temperature	≈ 600°C / ≈ 700°C
Secondary salt	Fluoride (FLiNaK)
Tertiary salt	Nitrate solar salt
Primary circuit pressure	≈ 5 barg
Steam pressure	≈ 16 MPa



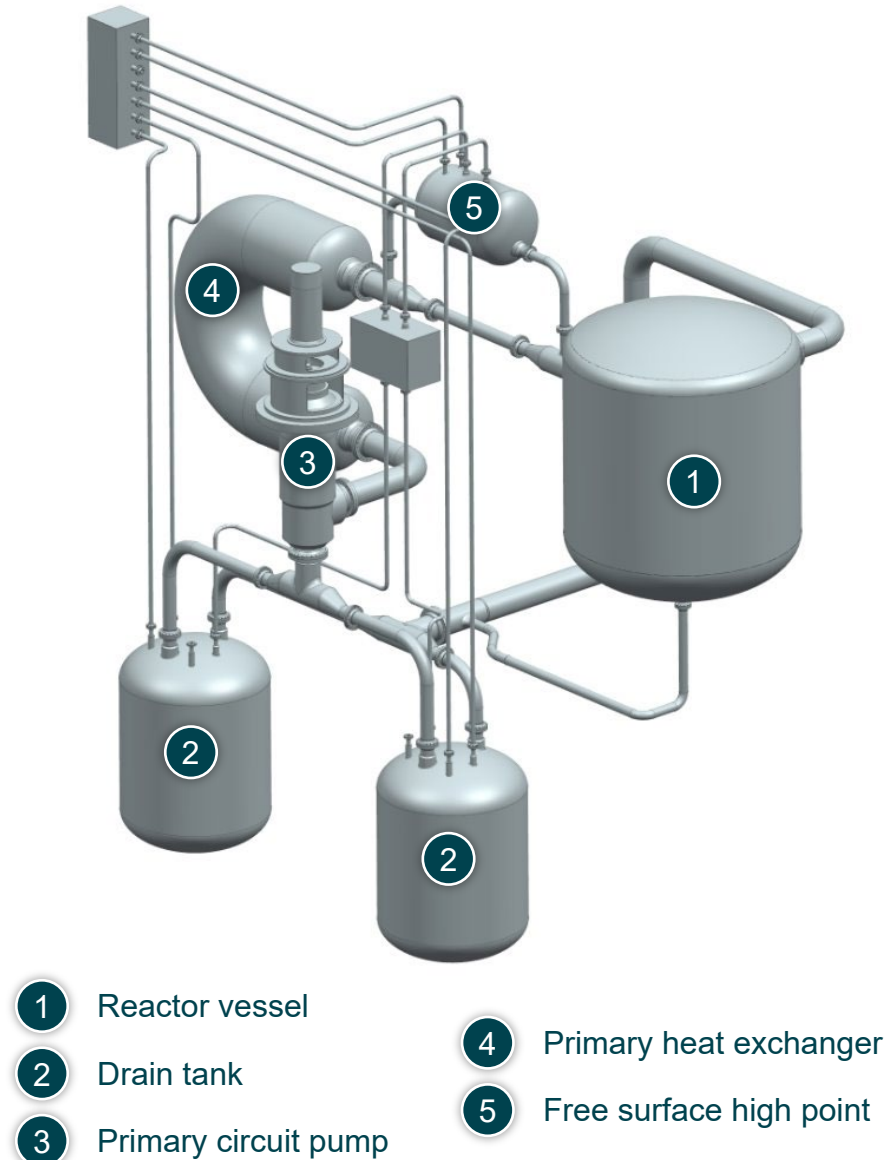
Primary loop

- 1 Reactor vessel
- 2 Drain tank
- 3 Primary circuit pump
- 4 Primary heat exchanger
- 5 Free surface high point



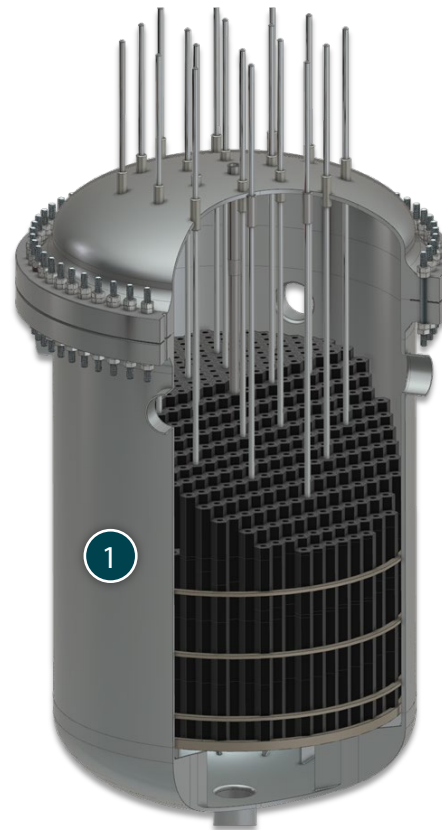
INTRODUCTION TO SALTFOSS

REACTOR CORE AND PRIMARY CIRCUIT

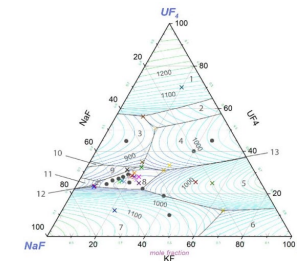
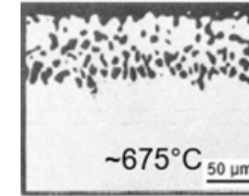


Reactor vessel

- Reactor internals re-designed to reflect 24 years lifetime.

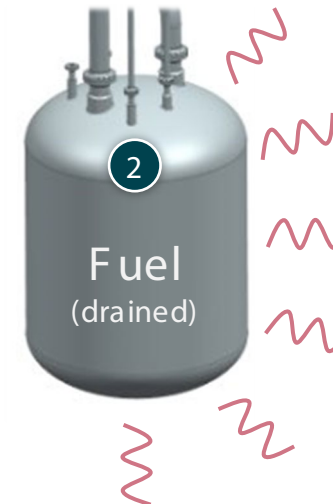


Corrosion control



- Corrosiveness of fuel salt increases with impurities, e.g., from fission products.
- Corrosion can be controlled through manipulation of redox condition with scaled proof-of-concept and demonstrated in MSRE.
- Scaled proof of concept confirming 24 years lifetime

Decay heat removal



- In case of emergency or accident, fuel salt is passively drained from the primary circuit to drain tanks.
- Fuel salt in drain tanks passively cooled through radiative heat transfer.

INTRODUCTION TO SALTFOSS

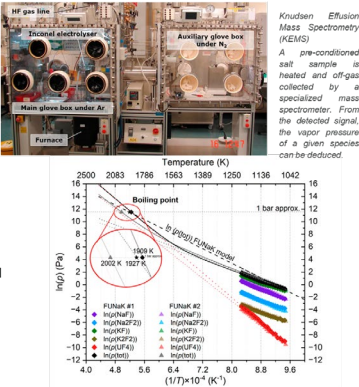
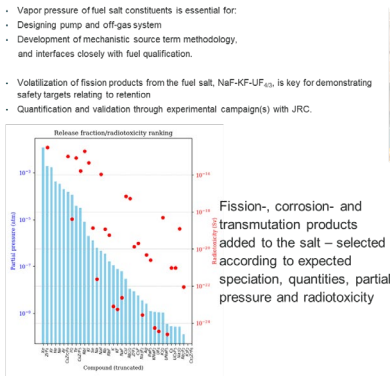
DESIGN IS READY FOR REGULATORY ENGAGEMENT

- ✓ Completed conceptual design with a total of 225 WBS documents & supporting docs
- ✓ Ready to start pre-application engagement with NSSC and KINS
- ✓ First step to discuss and align on administrative and technical topics

Category	# docs
Project Management Framework	11
System Engineering	9
Design Rules	8
Nuclear Safety	10
Modelling & Simulation	15
Reactor Core System	48
Safety Enclosure System	16
Salt System	32
Decay Heat Removal System	20
Off Gas System	22
Other Systems	14
Power Barge	28
Fuel Salt & Corrosion	9
Other Topics	13
Sum	225

- ✓ Thermophysical properties determined
- ✓ Positive results on corrosion control
- ✓ Graphite lifetime managed
- ✓ Vapour pressure as expected, Fission product retention experiments planned
- ✓ R&D Work on-going to qualify the fuel salt and validate the properties and fission product retention

MEASUREMENT OF FUNaK THERMOCHEMICAL PROPERTIES



FUEL SALT QUALIFICATION

Project carried out at and in partnership with The Pyrochemistry and Molten Salt Systems Department at INL. Flexible project with possible extension of scoping. Project split into 5 main phases,

Phase	Scope
A	Phase diagram verification and fundamental thermophysical properties measurements on a single composition of dUF ₆ -KF-NaF eutectic molten salt fabricated at INL.
B	Fundamental thermophysical properties measurements on dUF ₆ -KF-NaF with alternative compositions & surrogate fission products.

- Phase A completed with measuring thermophysical properties
- Phase B mapping thermophysical properties with respect to UF₃UF₄, surrogate additions of corrosion-, fission and transmutation products.
- Phase C/D preparations for fabrication of HEU-FUNaK and capsule setup for irradiation have begun



Irradiation of HEU FUNaK in the NRAD reactor at INL

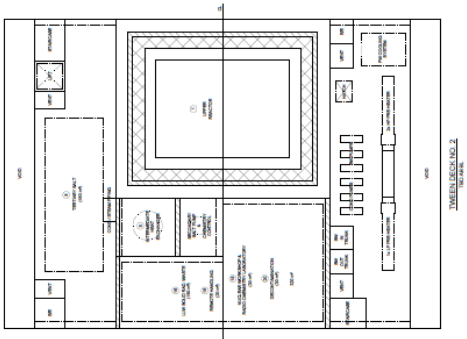
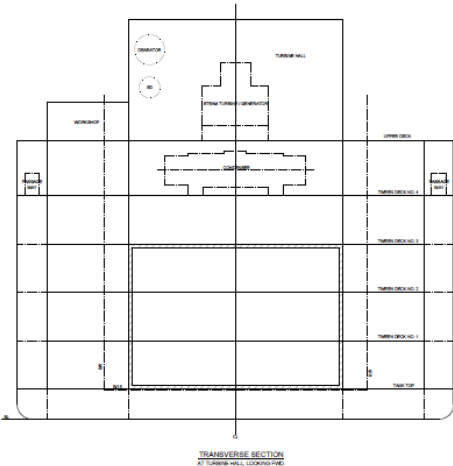
Phase	Scope
C/D	Capsule irradiation in ATR/NRAD reactor.
E	Property determination on irradiated salt & capsule.

Vital data collection for fuel qualification and safety case

- In-pile sensors
- Capsule analysis for corrosion behaviour
- Thermophysical properties of irradiated salt
- Identification and quantification of volatile species
- Radiolytic stability



- ✓ Baseline for basic design determined
- ✓ Reactor lifetime 24 years
- ✓ Basic design design in progress

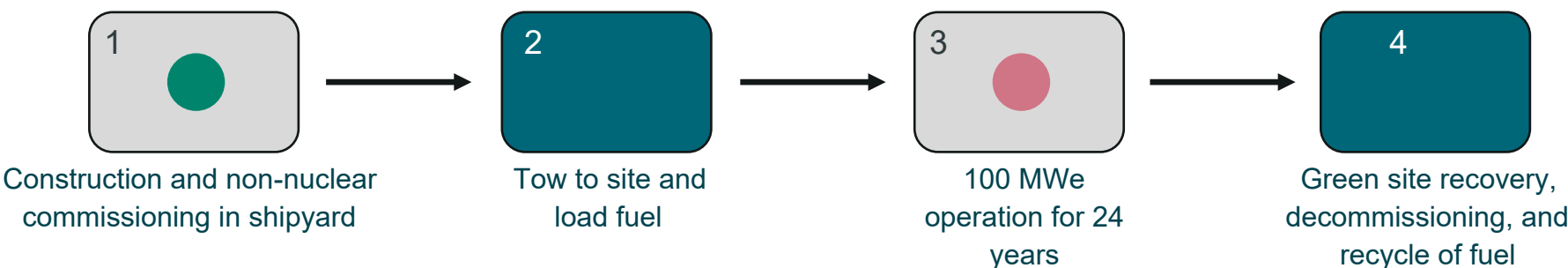
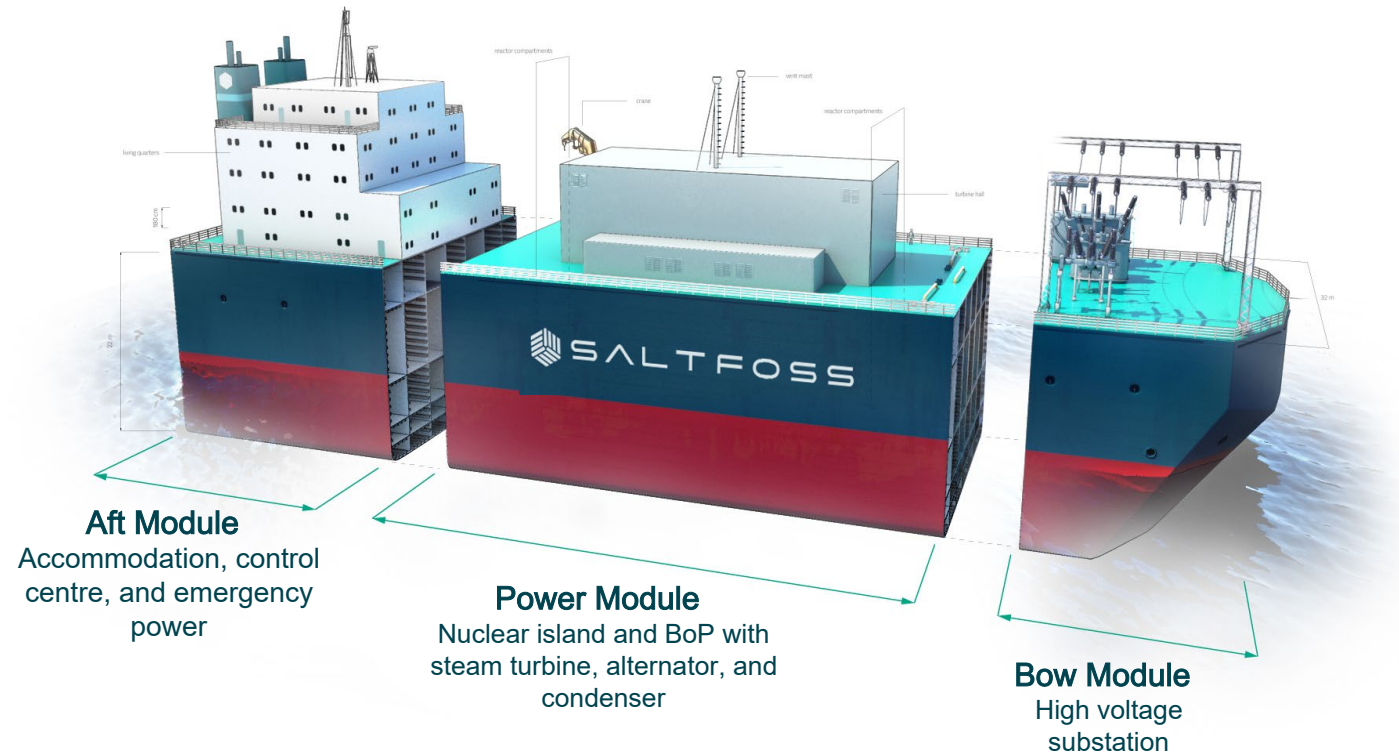


INTRODUCTION TO SALTFLOSS

SALTFLOSS POWER BARGE

POWER BARGE HIGHLIGHTS

- Floating Nuclear Power Plant Non-self-propelled.
- Graphite moderated thermal spectrum molten salt reactor fueled by fluoride fuel salt.
- One reactors, one balance of plant delivered $250\text{MW}_t/100\text{MW}_e$
- Plant designed for 24-year lifetime.
- Robust combination of inherent and passive safety features and designing for off-site EPZ



Variant	# reactors	Length
100 MWe	1	88 m
200 MWe	2	129 m
300 MWe	3	170 m
400 MWe	4	211 m
500 MWe	5	252 m
600 MWe	6	293 m

INTRODUCTION TO SALTFOSS

DESCRIPTION OF SITE AND PLANT



Tsunami



Weather



Collision

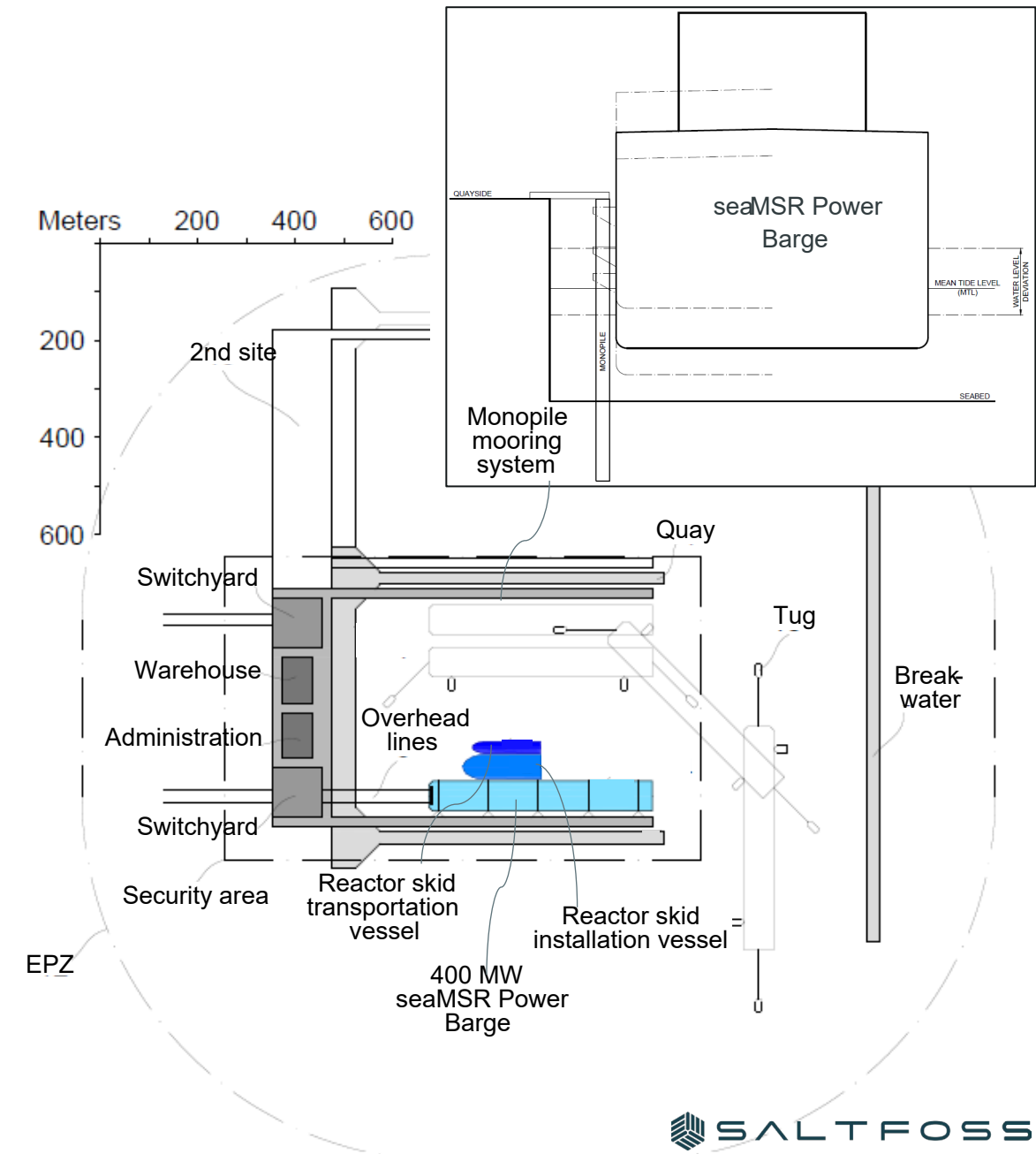


Sinking



Earthquake

- Standard environmental envelope
 - Enables *standardization* of Power Barge design.
 - Site preparation and approval must ensure envelope.
- Situated in sheltered waters (behind breakwaters)
 - Protects against direct wave impact and minimize rolling/pitching.
 - Eliminates possibility of large-scale maritime collisions that pose a danger to Power Barge hull.
- Mooring systems
 - Protects against extreme maritime events (together w/ breakwaters), e.g., tsunami. Will be demonstrated by model testing in wave tank.
- Emergency planning zone (EPZ)
 - The unique inherent safety features of the seaMSR, particularly the fission product retention of the fuel salt, ensures all accidents scenarios stays within a short distance from the Power Barge.
- Site security
 - Security measures shall be ISPS (International Ship and Port Facility Security code) compliant and shall prevent unauthorized access to the plant and shore-based installations.
 - Additional measures to be implemented depending on nuclear regulations.



INTRODUCTION TO SALTFOSS

ADVANTAGES OF INHERENT SAFETY FEATURES & FLOATING NUCLEAR APPLICATION



External Hazards

- Breakwater
- Protection against external hazards (tsunami, earthquake, volcanos, aircraft impact)



Emergency Planning Zone

- At the fence boundary
- No release of radioactive material outside the barge
- Able to be placed close to populated areas & industrial sites



Public Acceptance

- Due to inherent safety features and no release of radioactive material no accident risk
- Waste disposal
- Lower cost

Inherent Safety Features+ Standardised Concept+ Centralised Production+ Standardised Operational Setup
=
High Quality+ Licensing+ Scaling+ Lower Cost+ Faster Rollout

Consortium

to enable the deployment of the seaMSR Power Barge and expedite global export



Overall Licensing and Safety Case
Design, development and integration of the
Saltfoss reactor
Fuel cycle development & Qualification
Develop decommissioning path



Design, build and outfitting of power barge
Installation of all vendor systems and
packages
Non-nuclear commissioning



Fuel loading
Nuclear commissioning
Operator training
Power barge operation

CONSORTIUM

CENTRALIZED AND RAPID DEPLOYMENT



- Centralized shipyard manufacturing:
- Turn-key power plants ready for deployment
 - 600 MW per week production capacity
 - 3 years from order to grid



Consortium with industry leaders



Leveraging existing supply chain

Centralized modular plant construction	Centralized commissioning and testing	Centralized decommissioning
Faster construction time and scalable production	Standardized commissioning procedures	Standardized dismantling and handling of spent fuel and waste
High quality assurance and control	Faster operational readiness and implementation of lessons learned	Rapid site remediation & restoration



SHIPYARD MANUFACTURING STUDY BY LUCID CATALYST

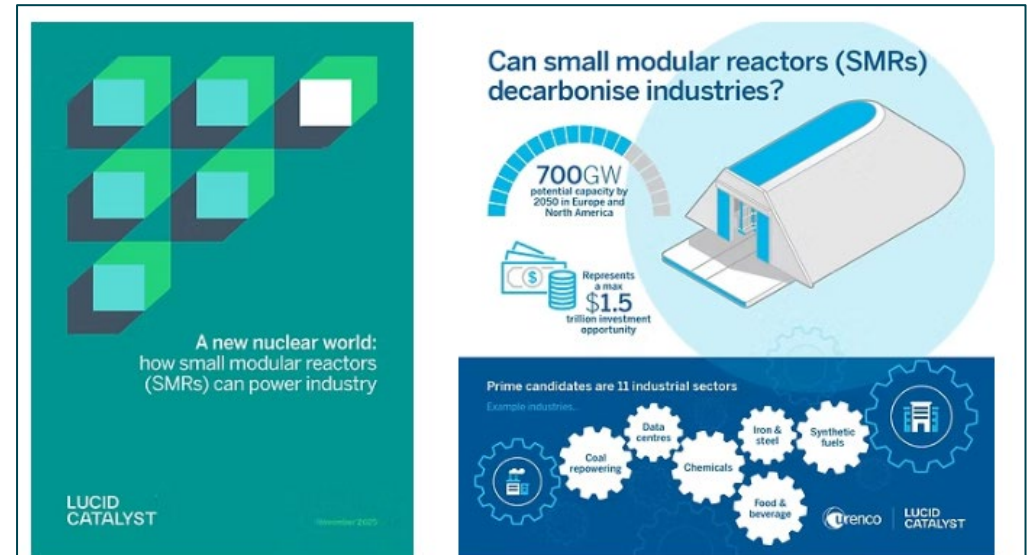
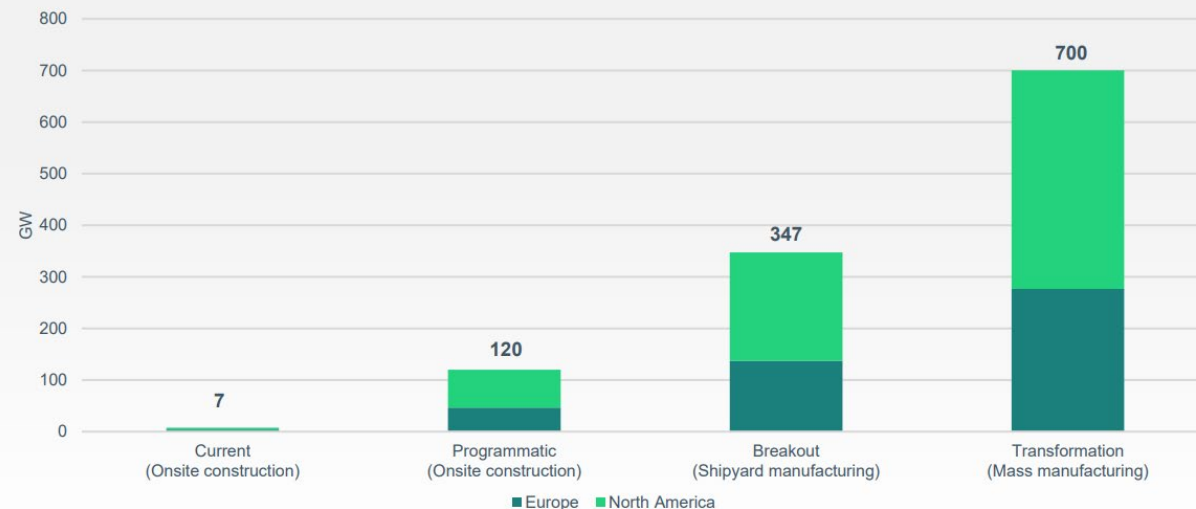
COMMISSIONED BY URENCO

Highlights:

1. Massive potential from shipyard manufacturing
2. Even higher potential from mass

Key finding: Massive – but uncertain – potential for SMRs

Accessible SMR market by supply scenario and region, Announced Pledges Scenario, 2050



A new nuclear world: how SMRs can power industry

November 2025

An independent study by LucidCatalyst, commissioned by Urenco, entitled, "A new nuclear world: how small modular reactors (SMRs) can power industry," published 13 November 2025 during COP30.

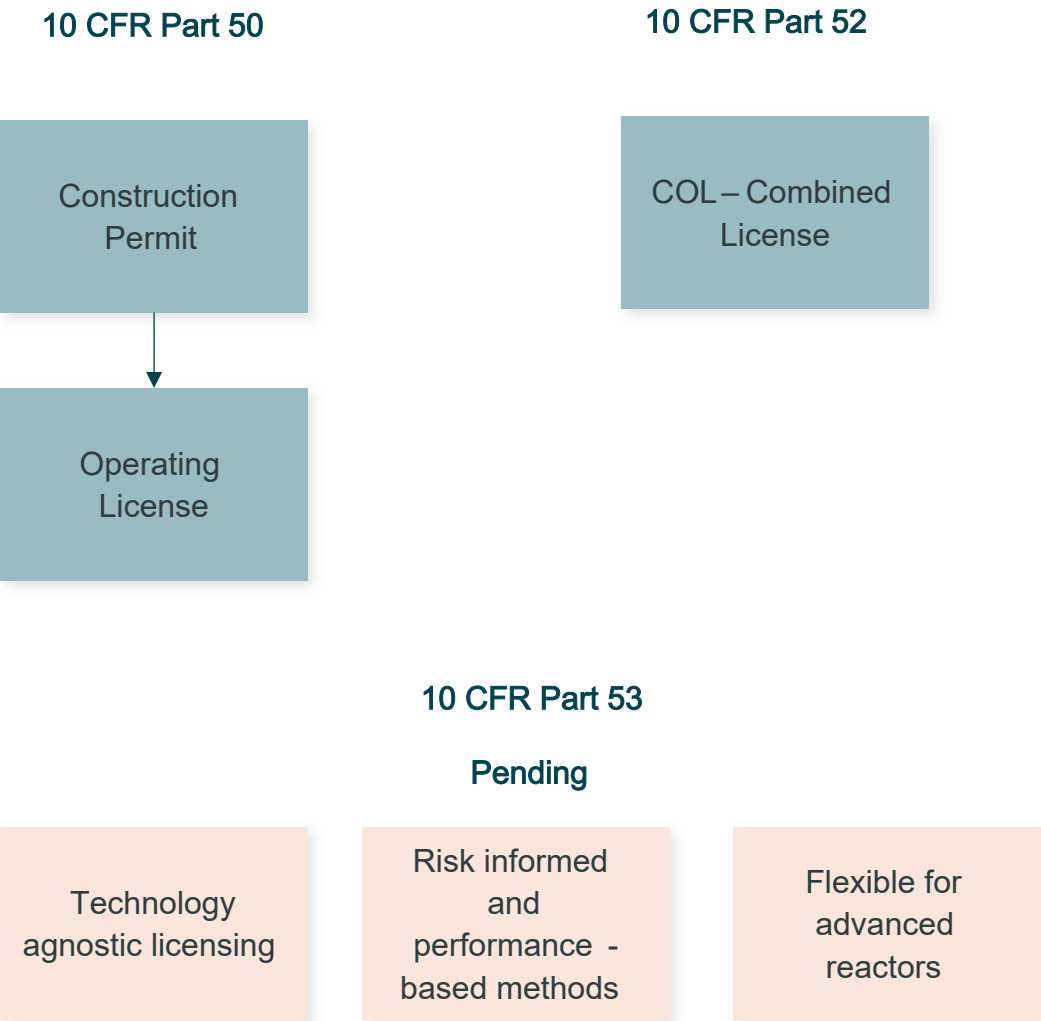
- > Read the [Full Report](#)
- > Read the [Urenco Press Release](#)
- > View presentation of [Preliminary Findings](#)

Urenco commissioned this independent study, delivered by LucidCatalyst, to better understand the potential role of Small Modular Reactors (SMRs) in helping industries decarbonize while maintaining energy security and competitiveness. The analysis provides an evidence base on the market opportunity for SMRs and the conditions needed for deployment at scale in Europe and North America. The report is supported by World Nuclear Association.

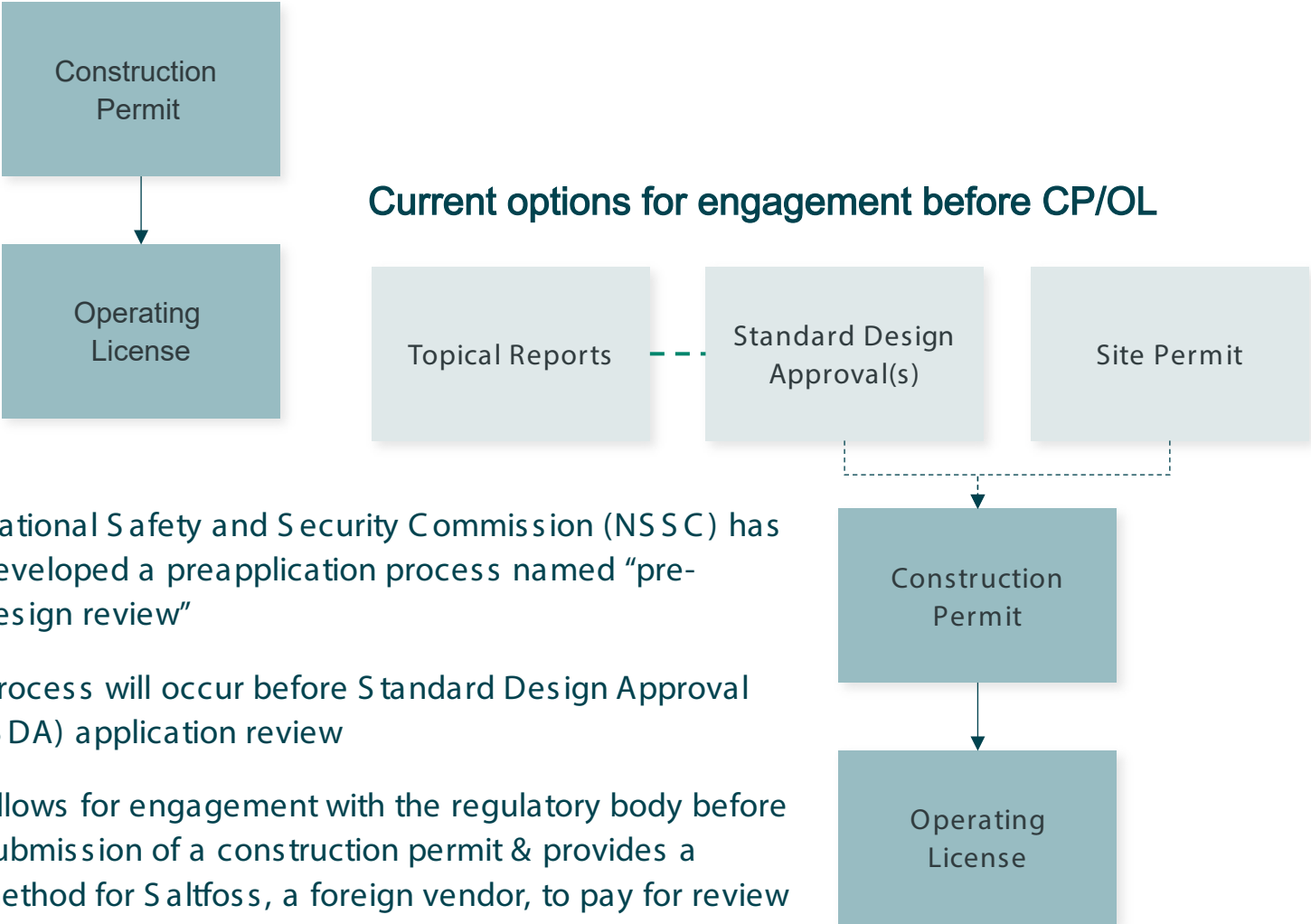
LICENSING PROCESS

U.S & SOUTH KOREA

Three Options



One Option Based on Part 50

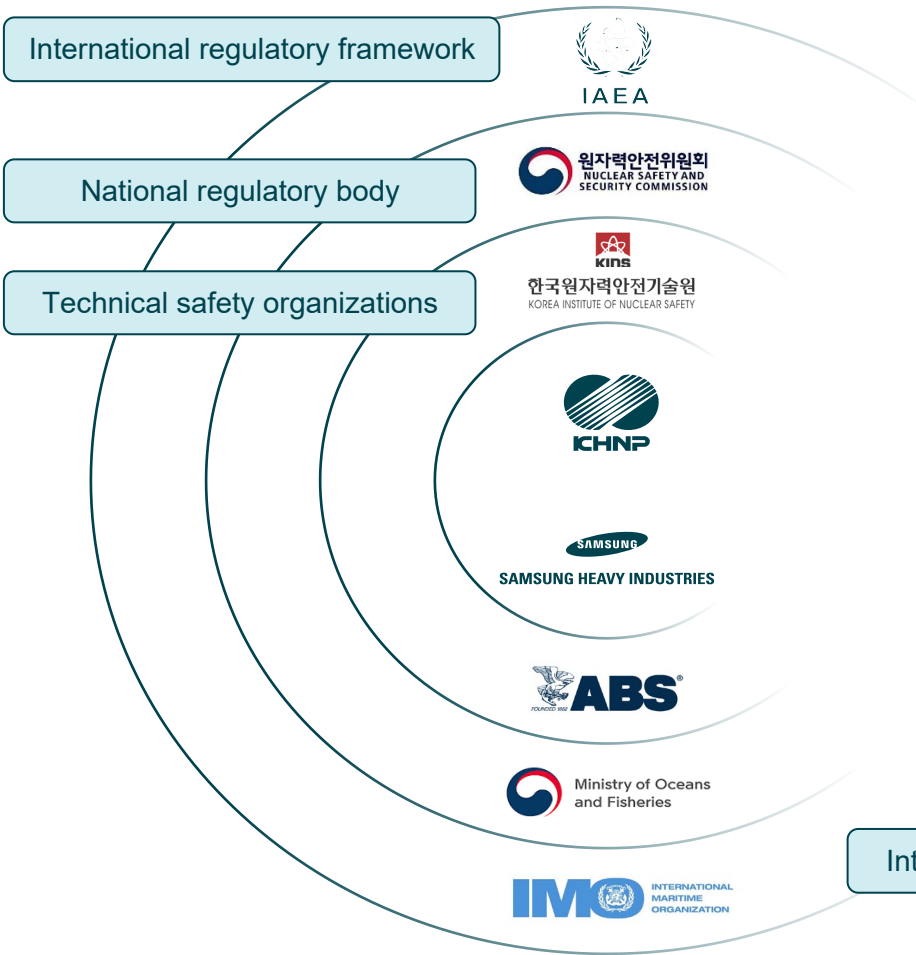


- National Safety and Security Commission (NSSC) has developed a preapplication process named “pre-design review”
- Process will occur before Standard Design Approval (SDA) application review
- Allows for engagement with the regulatory body before submission of a construction permit & provides a method for Saltfoss, a foreign vendor, to pay for review services

COMBINING NUCLEAR AND MARITIME REGULATORY APPROVAL TO ENABLE EXPORT

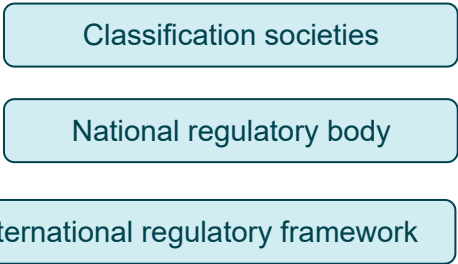
NUCLEAR

- First Power Barge will be licensed in Korea (First of-a-kind *FOAK*)
- Using the existing framework in place for licensing the FOAK utilizing exemptions where necessary and applicable
- Prior to submitting licensing applications, rely heavily on regulatory engagement for familiarization of technology and design
- Use of topical and technical reports for unique design features and methodologies
- First licensing submittal will be regulatory engagement plan and required documents per the new framework



MARITIME

- American Bureau of Shipping (ABS) New Technology Qualification process for CMSR
- ABS Novel Concept guidelines for integrating the seaMSR into the power barge.
- October 2024 ABS has issued class requirements applicable for nuclear power barges.
- Conceptual design submittal to ABS



SETTING THE STANDARD FOR MARITIME NUCLEAR POWER

Aspiration

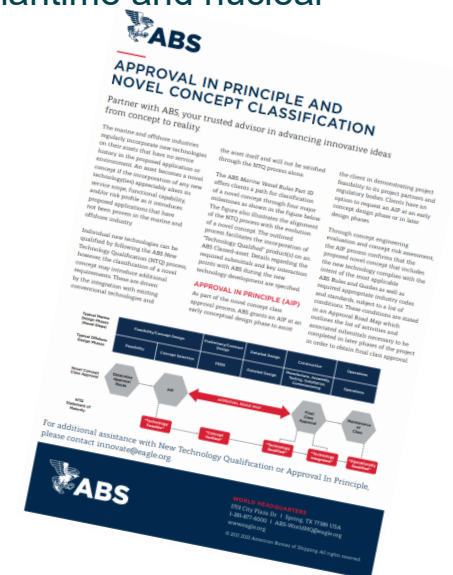
- In a strive to set the precedence for a future international regulatory framework, the consortium wants to pursue **nuclear licensing and approval in Korea from the NSSC** and **Korean Flag State approval from the Ministry of Ocean and Fisheries (MOF)**, with classification of the power barge by ABS, to drive the integration of the maritime and nuclear frameworks.
- ABS reviews and approve the maritime parts and aspects of the seaMSR-100 and the power barge.
- ABS reviews and comments on the nuclear parts and aspects of the seaMSR-100 and the Power Barge.
- The reviews by ABS serves as input KINS in their review.

Proposal:

- MOF grants ABS the contract to class and issue statutory maritime approvals for Korean flagged vessels for nuclear power application, hereunder nuclear power barges.
- Korean Registry (KR) serves as technical advisor to MOF in the dialogue between MOF and ABS to establish, implement, and apply a regulatory framework for Korean flagged vessels for nuclear power application, hereunder nuclear power barges.
- KR serves as MOF's representative in the dialogue between KINS and ABS to establish the interface between nuclear and maritime

Maritime Assessments Status:

- **CMSR feasibility assessment** was completed in **June 2020**
- **Power Barge Approval In Principle was granted in December 2022**
- Conceptual design planned to be submitted for review
- Development of interface document which outlines the responsibilities of both maritime and nuclear regulatory bodies.



LICENSING ACCOMPLISHMENTS



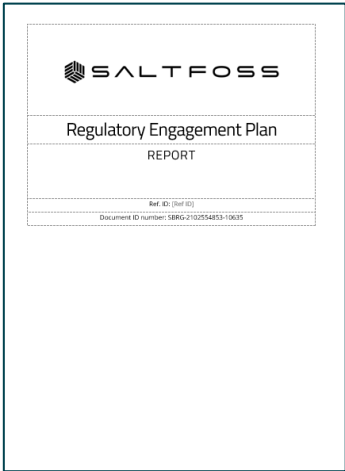
- Completed feasibility study 2023
- Recommendation:
- Pre-regulatory engagement

Development of licensing reports

- Use of PSA
- QA Program
- IMO Standards
- Format and content of SSAR and PAMP
- Siting related issues
- Exemption and alternative requests
- Fuel qualification



Regulatory engagement plan



Regulatory engagements



- Only foreign company to attend the 2025 advanced reactor round table
- Held several seminars for KINS covering design development, licensing approach, and implementation of the regulatory engagement plan
- Initial discussions with Ministry of Oceans and Fisheries to discuss approach to classification of Power Barge
- Initial meeting with KINAC to introduce Saltfoss Energy

FIRST OF A KIND ROADMAP

LICENSING

Overall goal

Gain agreement on the exemptions and alternative approaches with respect to regulations that cannot be met as written for the MSPB design.

Discuss and gain general agreement on a preliminary timeline for submittal of topical and technical reports.

- During pre-design review, regular meetings and familiarization sessions can help identify potential licensing issues through mutual technical and regulatory understanding.
- Saltfoss has identified a preliminary list of issues that are expected to be discussed during preapplication.
- Submit relevant reports to facilitate early issue resolution during the preapplication period.



FIRST OF A KIND ROADMAP

PROPOSED TECHNICAL & LICENSING TOPICS TO BE ALIGNED ON FOR SUCCESSFUL LICENSING

TECH:

- Safety approach
- Testing plan for safety demonstration
- Simulation tools for safety analysis and associated confirmatory analysis
- Codes and standards alignment
 - Maritime & nuclear
- External hazards
- Primary circuit and reactor core layout
- Safety classification of SSCs
- Emergency planning zone
- Safeguards
- Security

LICENSING:

- MSR technology familiarization.
- MSR power barge design familiarization.
- Explain and gain general agreement on the proposed SDA application licensing strategy.
- Gain agreement on the exemptions and alternative approaches with respect to regulations that cannot be met as written for the Power Barge design.
- Discuss and gain general agreement on a preliminary timeline for submittal of topical and technical reports.
- Format and content of licensing applications
- Combined nuclear and maritime compliance framework.



FIRST OF A KIND ROADMAP

PRIORITIES FOR REGULATORY ENGAGEMENT 2026

- Issuance of pre-design review framework
- Begin familiarization of MSR technology and Saltfoss seaMSR and Power Barge design
- Regulatory presentation and review of:
 - Safety approach

- Acceptance of application of risk informed insights
- Defence in depth
- Final classification of SSCs



Could result is major redesign efforts if approach cannot be agreed upon

FIRST OF A KIND ROADMAP

PRIORITIES FOR REGULATORY ENGAGEMENT 2026

- Testing plan for safety demonstration

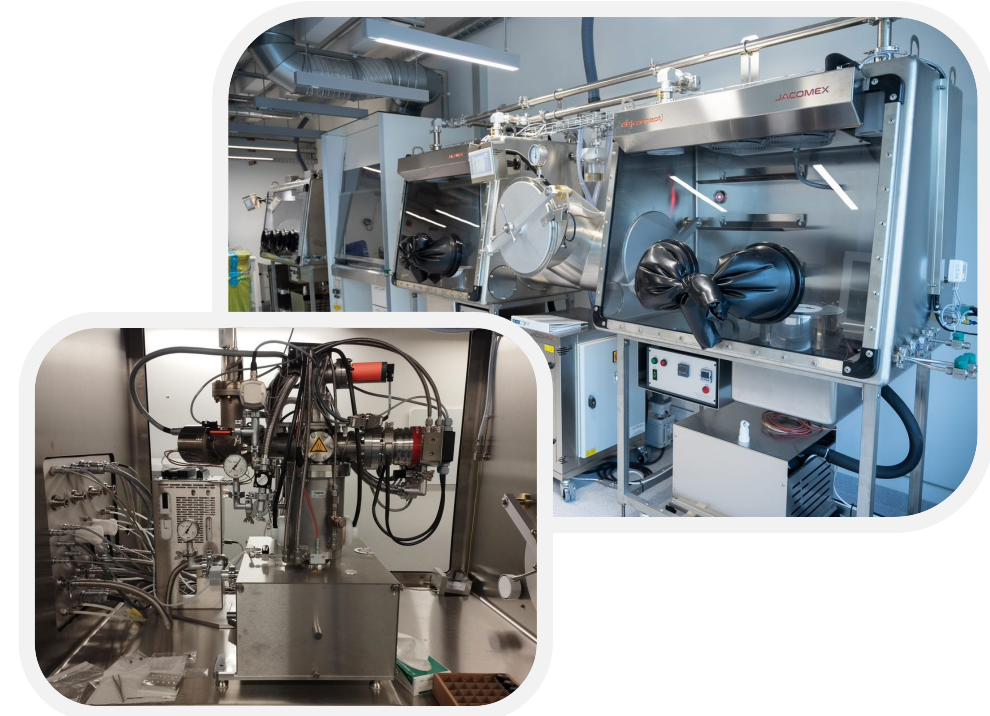
Alignment needed to confirm:

Appropriate experiments and testing

Access to and/or purchase of facilities

Can Impact:

Approach to licensing documentation for SDA, Construction Permit, and Operating License



- Simulation tools for safety analysis and associated confirmatory analysis

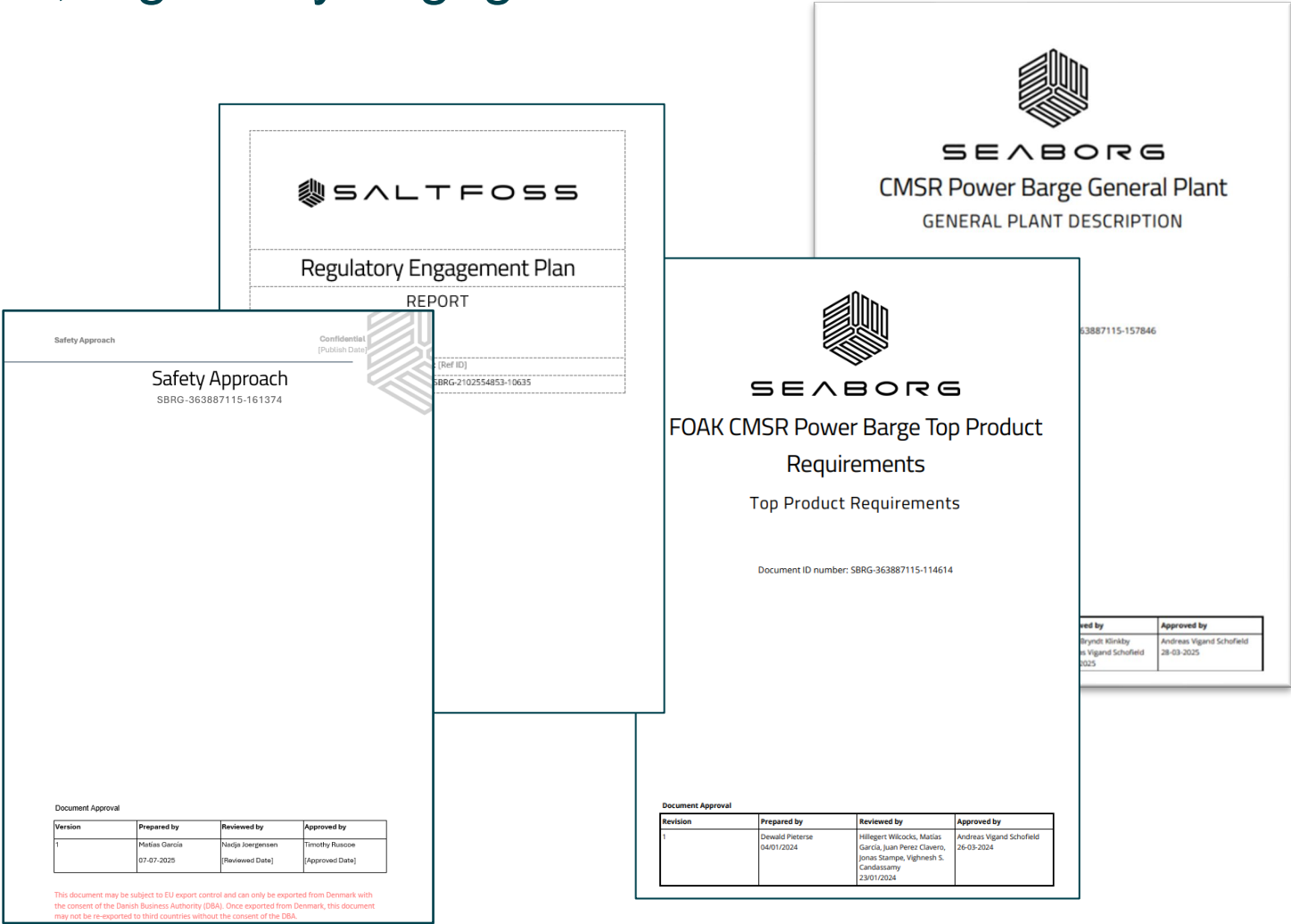
New tools and associated confirmation of the tools

Regulatory approach to confirmatory analysis

FIRST OF A KIND ROADMAP

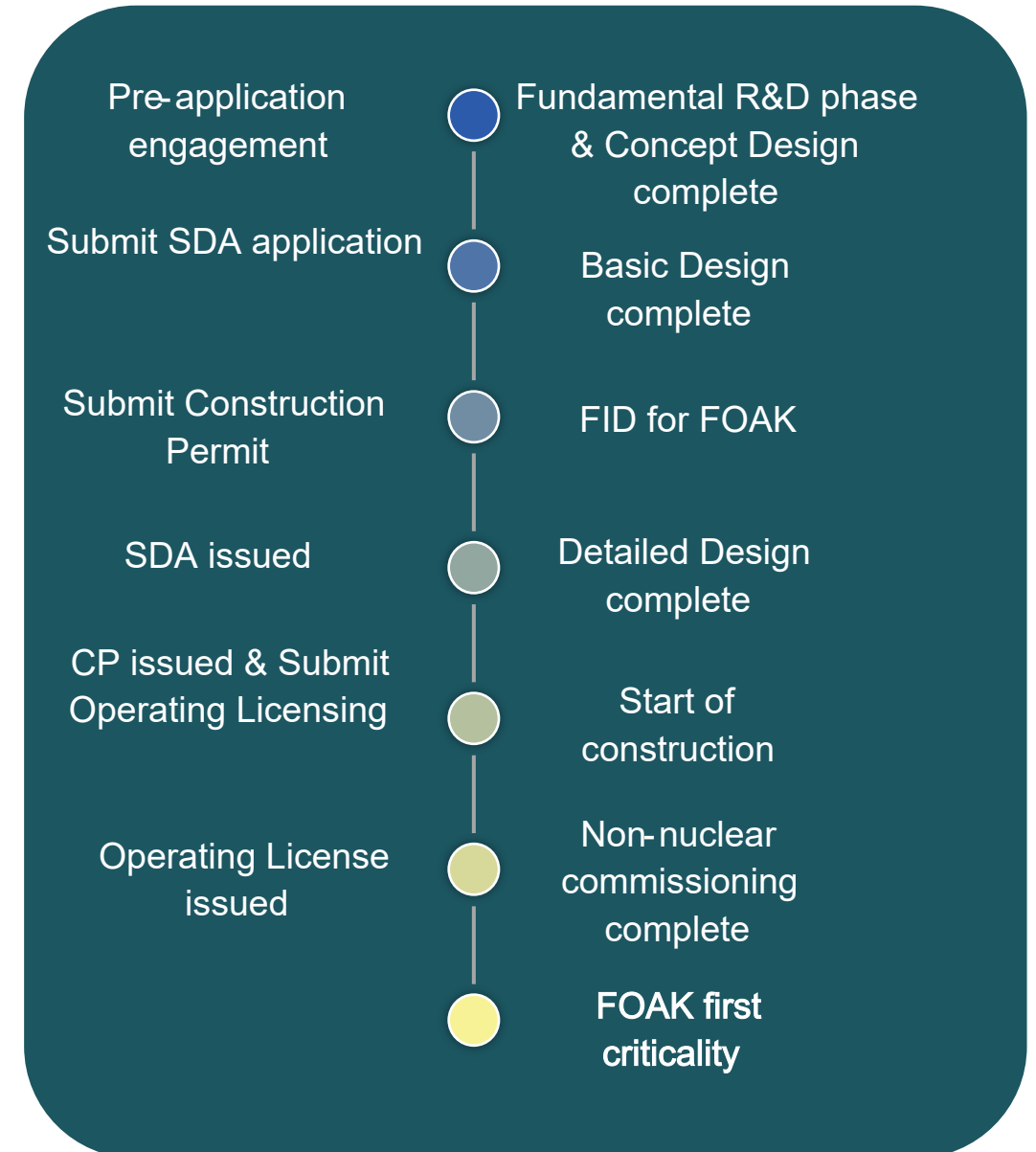
PRIORITIES FOR REGULATORY ENGAGEMENT 2026

- Submittal of pre-design review documents possibly including general plant description, gap analysis, regulatory engagement plan



ACHIEVEMENTS & ROAD TO DEPLOYMENT

- **Tech**
 - Conceptual design complete
 - Basic design underway
 - R&D on-going
 - Safety analysis development in progress
- **Licensing**
 - CMSR maritime feasibility assessment was completed in June 2020
 - Power Barge Approval In Principle was granted in December 2022
 - Completed licensing feasibility study 2023
 - Development of licensing reports and regulatory engagement plan
 - Continued engagement with NSSC, KINS, KINAC, MOF covering design development, licensing approach, regulatory engagement plan, classification of Power Barge, etc.
- **Other opportunities**
 - Thailand- pre-feasibility study completed, ongoing dialogue with the regulatory body to prepare for advanced reactor licensing and operation. Next licensing steps could include; site specific and external hazard evaluation, training to become a nuclear ready organization.
 - Indonesia- Study to be performed on specific licensing topics such as external hazard identification and evaluation of floating nuclear sites with nuclear research institute (BRIN).
 - Vietnam- (1) Inception report developed in 2022 which was a preliminary study on the feasibility of deployment of Power Barges and hydrogen production plant in Vietnam, (2) Participating in Vietnam's INPRO Program (IAEA)





감사합니다

Tak

Thank you

www.saltfoss.com



제4차 원자력안전규제의 미래 워크숍

SMART100 표준설계인가 경험과 시사점 (일체형 원자로와 피동안전계통)

강한옥

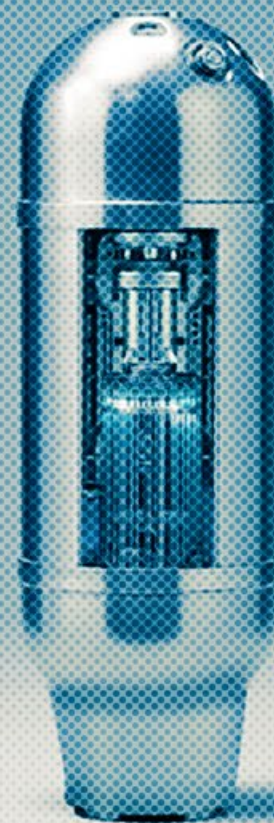
2025.12.19 (금)



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

CONTENTS

- 01 SMART 개발 배경 및 과정
- 02 SMART100 표준설계인가
- 03 SMART100 원자로
- 04 의미 및 시사점



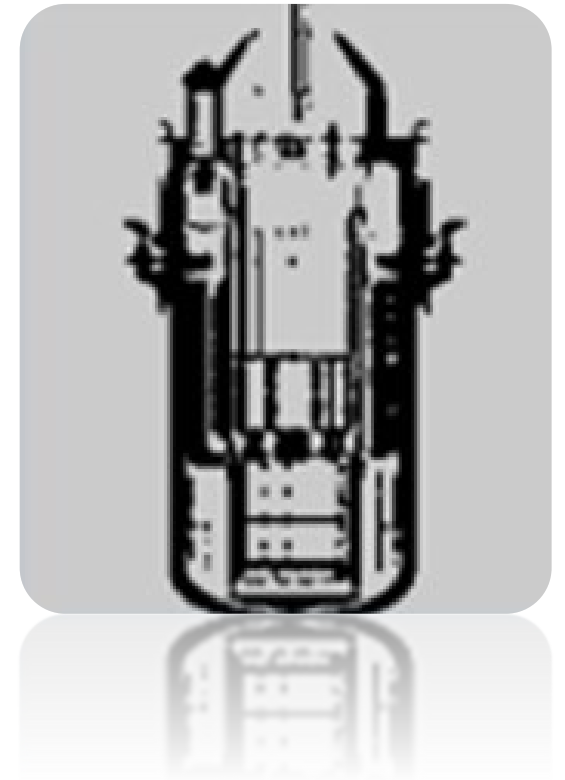
01 SMART 원자로 개발 배경

■ 우리나라 원자력계 ('90년대)

- 산업계 : 1400 MWe급 차세대 발전용 대형 원자로 개발 (G7 프로젝트*, 現 APR1400)
- 연구계 : 혁신개념이 적용된 발전용 원자로 개발을 위한 의견 수렴 (G7 프로젝트, NP2015**)
 - 혁신개념 : 원자로 안전과 관련한 “**Passive Safety System**” 접목된 신형 원자로

■ SMART 원자로 개발의 시작 (1997년)

- “**발전용**” 원자로는 산업적 이용을 목표로 하는 산업계가 주도하는 것으로 결정
- “**다목적 활용**” 및 “**분산형 건설**”로 “**중소형 일체형 원자로**”로 개발방향을 수립
 - 기술개발 중복을 피하고 미래를 지향한 신형원자로
 - 대용량 발전용이 아닌 수출 가능한 해수담수화 및 소규모 전력생산을 목적으로 함
- IAEA는 원자력을 “해수담수화” 에너지원으로 활용하는 기술협력 프로그램 추진



* G7 프로젝트 : 과학기술 분야에서 세계 기술수준 Top 7 (Global 7)에 이르는 목표로 과기부와 산업부가 공동으로 추진

** NP2015 : 2015년까지 개발 완료

01 SMART 원자로 개발 과정(I)



신형원자로기술개발 ('94~'97)

- Passive Safety System 등 핵심 요소기술 개발
- 다양한 개념 검토 (heat pipe, 자연순환, 자동압력조절 등)



고유안전로 개발 ('95~'97)

- 대용량 고속 컨테이너선 엔진
- 선박내 좁은 공간 설치를 위한 시스템 단순화



한·러 중소형 원자로 기술협력 ('95~'98)

- IAEA 전문가 회의 러시아 원자력연구소 전문가와 기술 협의
- RDIP* 연구소 협력기관 선정 / 한·러 기술협력약정서 ('95.6)**
- 전력 및 해수담수화 목적 / 모스크바 사무소 파견 ('95~'98)

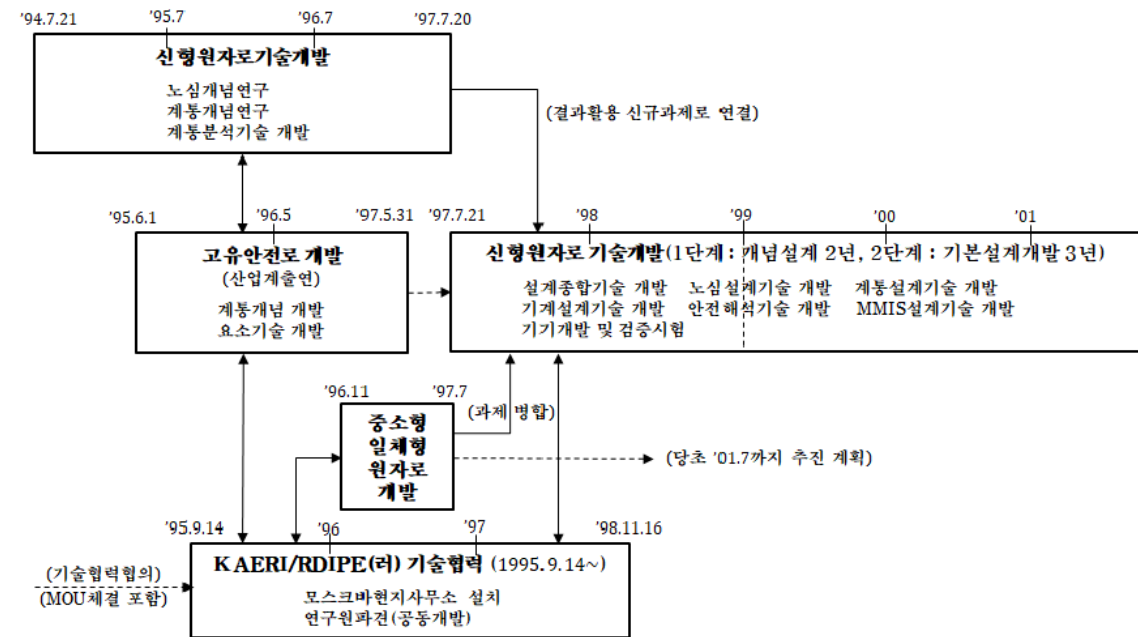
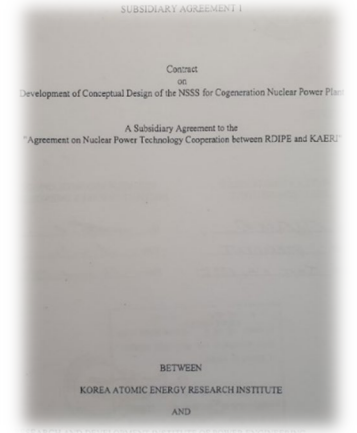


신형원자로 기술개발 ('97~'01)

- “한러 기술협력” 및 “중소형일체형원자로개발” 핵심기술 종합
- 우리나라 고유의 100 MWe급 일체형 원자로 개념 개발

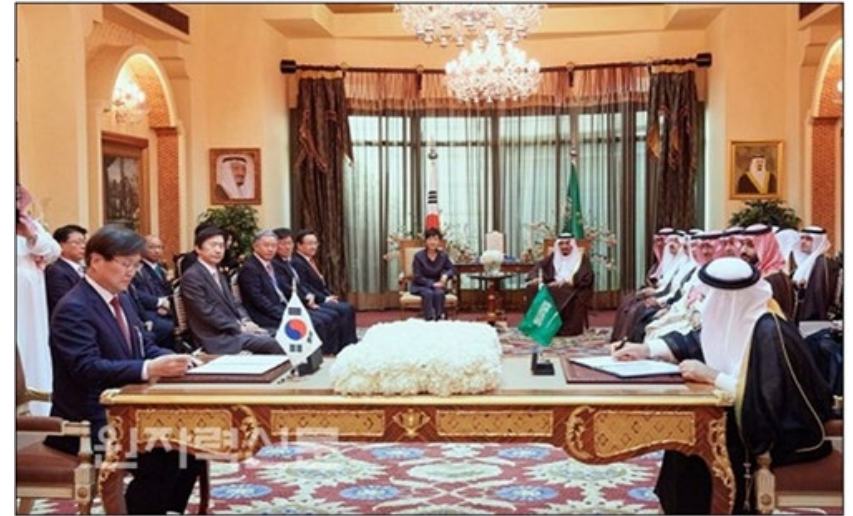
* RDIP : Research and Development Institute of Power Engineering

** 신형원자로 기술, 엔지니어링, 검증시험 및 재료개발, 부품설계 및 제작 등

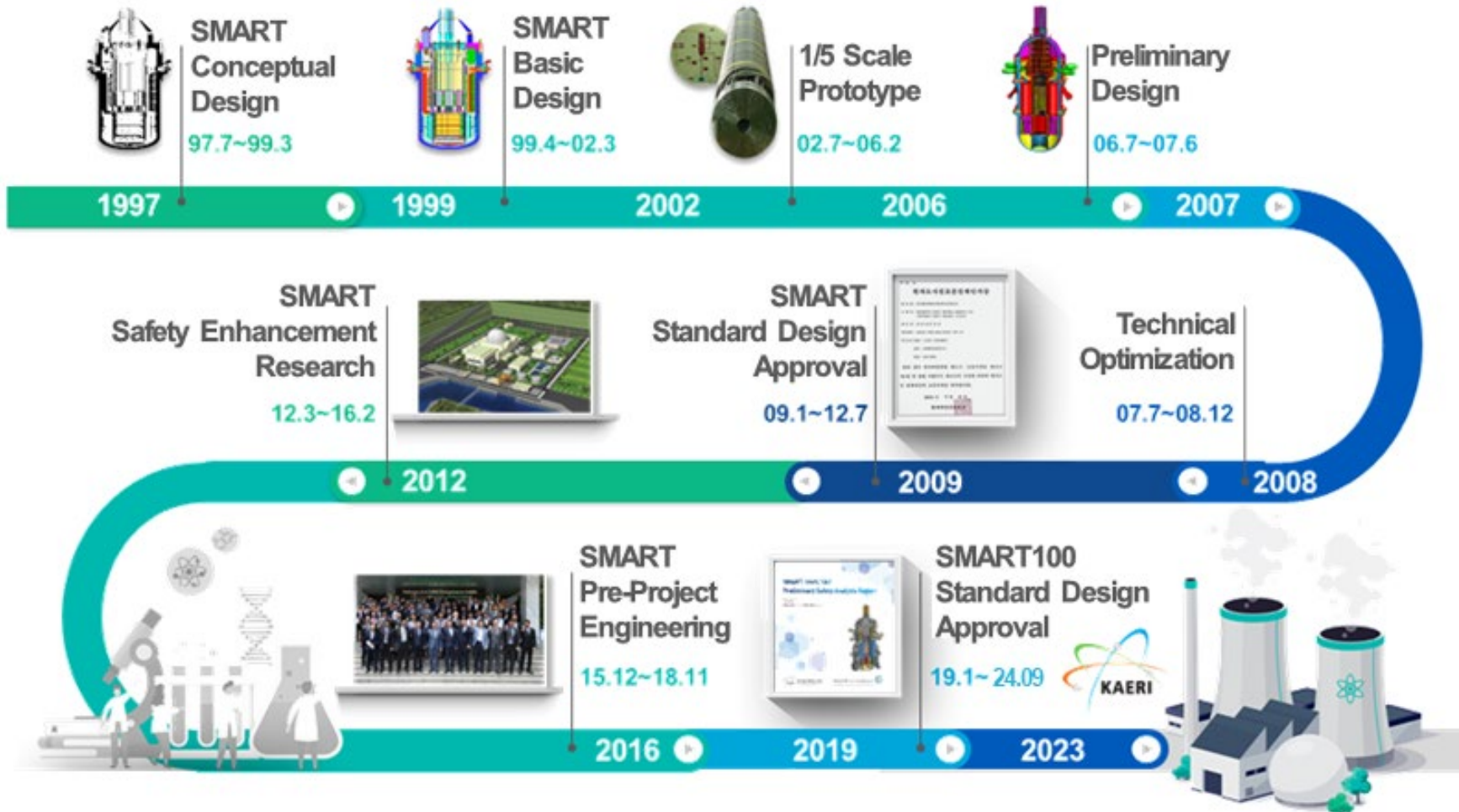


01 SMART 원자로 개발 과정(II)

- ❏ SMART 개발 및 표준설계인가 획득 ('09~'12)
 - 정부 주도의 개념설계 및 기본설계 완료 이후, 민관이 협력하여 SMART 기술검증을 완료하고 '12년 세계 최초로 표준설계인가를 획득
- ❏ SMART 안전성 향상 ('12~'16)
 - '11년 발생한 후쿠시마 사고와 같은 상황에서도 안전성을 확보하도록 SMART에 피동안전개념(피동안전주입, 피동잔열제거, 피동격납 건물냉각 등) 적용
- ❏ 한-사우디 SMART 건설전설계(PPE) 사업 ('15~'18)
 - SMART 수출 촉진을 위해 사우디와 파트너십을 구축하고 기존 SMART 대비 안전성·경제성 및 출력을 향상시킨 SMART100 개발 및 플랜트 종합설계 수행
- ❏ SMART100 표준설계인가사업 ('19~'24)
 - SMART100 해외 건설 및 수출에 필요한 안전성 및 인허가 시현성 확보를 위해 SMART100 표준설계인가 추진



01 일체형 원자로 개발 경과



제 4 호

원자로시설표준설계인가증

1. 법인명: 한국수력원자력(주), 한국원자력연구원, 사우디 왕립원자력신재생에너지원
2. 주소
 - 한국수력원자력 : 경상북도 경주시 문무대왕면 불국로 1655
 - 한국원자력연구원 : 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
 - 사우디 왕립원자력신재생에너지원 : PM5H+4JX 12244 Al Olaya, Riyadh Kingdom of Saudi Arabia
3. 대표자
 - 한국수력원자력 : 황주호
 - 한국원자력연구원 : 주한규
 - 사우디 왕립원자력신재생에너지원 : H.H. Dr. MAMDOOH AL SAUD
4. 원자로의 명칭: 스마트100 (SMART100)
5. 종류: 일체형가압경수로
6. 용량: 365 MWt

위와 같이 「원자력안전법」 제12조, 같은 법 시행령 제22조제1항 및 같은 법 시행규칙 제9조에 따라 원자로 및 관계시설의 표준설계를 인가합니다.

2024년 9월 26일

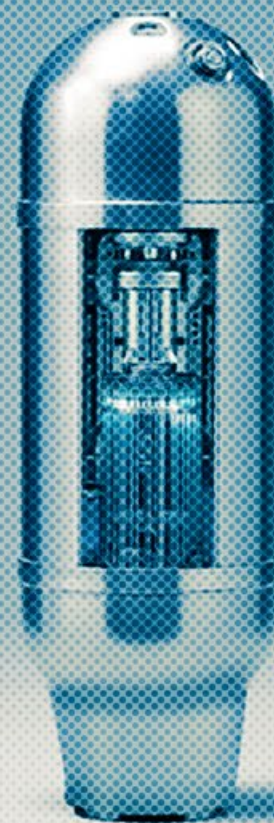
원자력안전위원회



2024.09.26

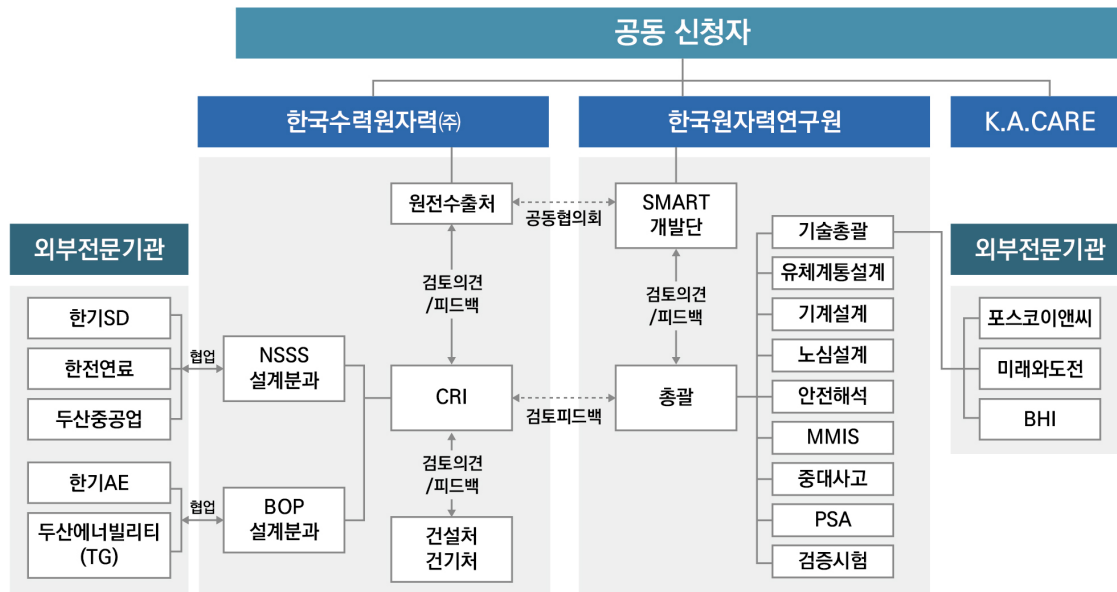
CONTENTS

- 01 SMART 개발 배경 및 과정
- 02 SMART100 표준설계인가
- 03 SMART100 원자로
- 04 의미 및 시사점



02 SMART100 표준설계인가 신청

- 3개 기관 (한국수력원자력, 한국원자력연구원, 왕립원자력신재생에너지원)이 공동신청자 자격으로 ‘원자로시설 표준설계인가신청서’와 주요 인허가 문서를 원자력안전위원회에 제출 (’19.12월)
- 신청기관 중 왕립원자력신재생에너지원은 사우디 기관으로 표준설계인가 획득 시 해외수출 당위성을 갖기 위해 인허가 문서는 국문과 영문을 함께 제출



02 SMART100 표준설계인가 주요심사경위

• (KINS) 심사 주요 경위

- 2019.12.30. : 표준설계인가 신청서 원자력안전위원회 제출
- 2021.08.13. : 원안위 서류적합성 검토 결과 및 심사 계획 보고
- 2021.08.17. : 서류적합성 검토 결과, 심사 계획 신청자 통보 및 본심사 착수
- 2021.08.17. ~ 2024.04.02.(32개월) : 총 12차례 2,621건 심사 질의

• (전문위) 원자력안전전문위원회 보고

- 2023.05.12. : 표준설계인가 개요 보고
- 2023.06.02., 07.07 : 원자력안전전문위원회 SMART100 설계특성 보고
- 2023.11.03. : 전문위 SMART100 심사현황 보고
- 2024.04.19., 05.17 : SMART100 표준설계인가 심사 결과 보고

• (실무위) 실무검토위원회 운영

- 2023.12.01.~2024.03.15. : 피동안전계통 실무검토위원회 운영(총 3회)
※ 제98회 전문위원회를 통해 피동형안전계통 추가 검토 논의
- 2024.05.02.~ 2024.05.27 : 전력계통 실무검토위원회 운영 (총 2회)
※ 제103회 전문위원회를 통해 전력계통 추가 검토 논의

• (원안위) 원자력안전위원회 의결

- 2024.07.11. : 원자력안전위원회 SMART100 표준설계인가 심의 관련 보고
- 2024.09.26. : 원자력안전위원회 SMART100 표준설계인가(안) 심의 의결

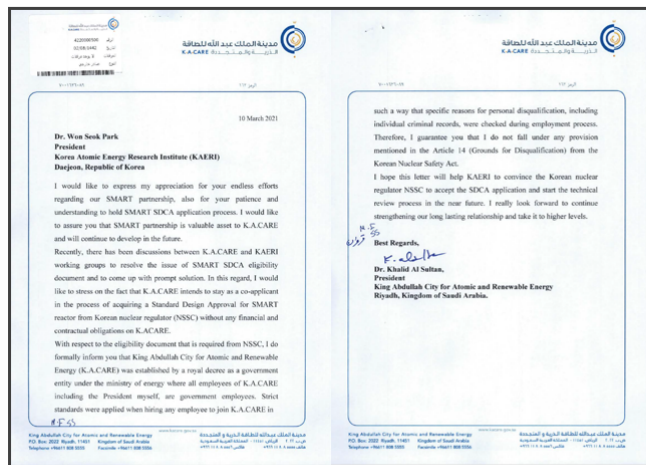


02 SMART100 신청서류 적합성 검토

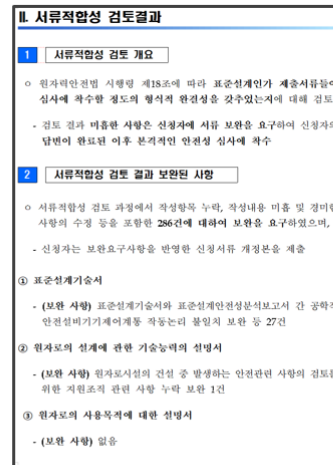
☞ 규제기관은 제출된 신청서류에 원자력안전법 시행규칙 및 원안위 고시에 따른 각 항의 내용을 기술하였으며 그 내용이 **심사/참조 기준에 부합**하는지를 검토

- 검토 결과, 안전기술원은 작성항목 누락, 작성내용 미흡 및 경미한 사항의 수정 등을 포함한 286건을 보완요구 하였고, 신청자는 이를 모두 반영한 최종본을 2021년 3월에 제출
- 이후, 안전기술원은 신청서 및 첨부서류가 관계법령 및 고시에서 규정한 첨부 문서로서의 형식 및 내용을 충족하고 있다고 판단하고 본심사에 착수

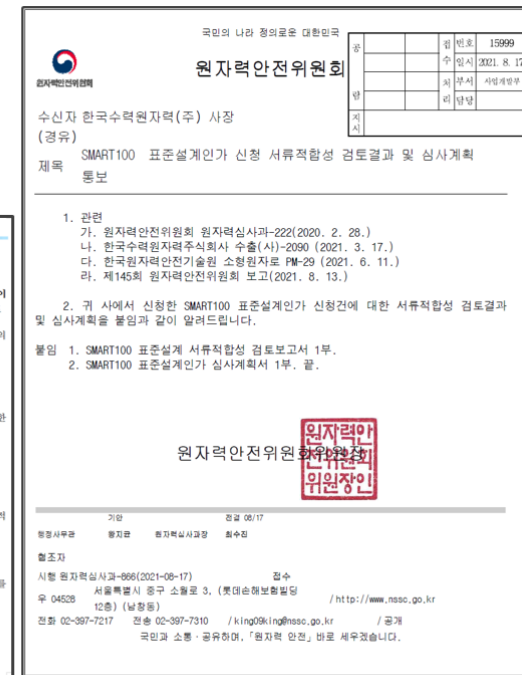
- 총 질의 수 : 286 건 (完)
- 인허가 문서(3종) 및 신청서류에 대한 보완 (完)
- 원자력안전법 14조 : K.A.CARE 기관장 신청자격 증빙 (完)



사우디 K.A.CARE President 자격증명 서한 (2021.03)



서류적합성 심사결과 및 심사계획 통보 공문 (본심사 착수)

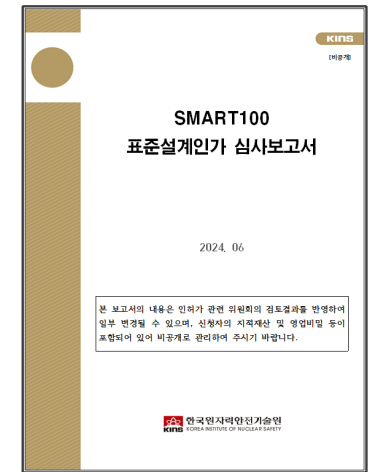
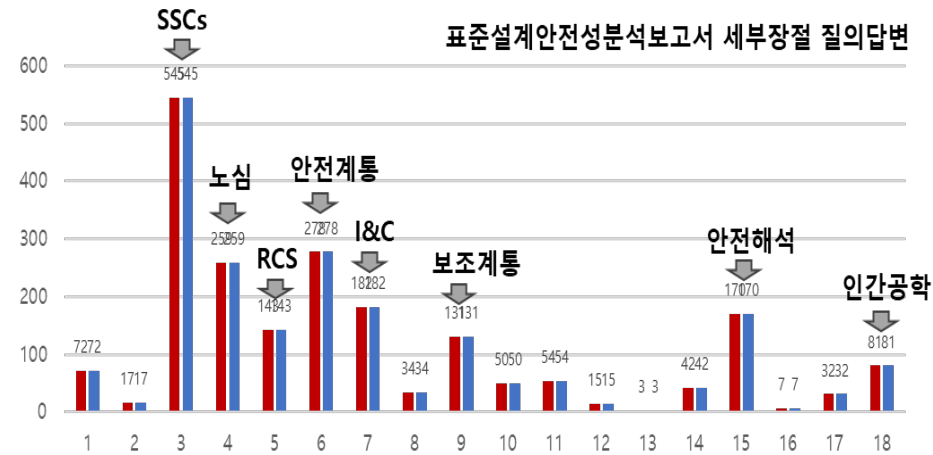


02 SMART100 표준설계인가 본심사

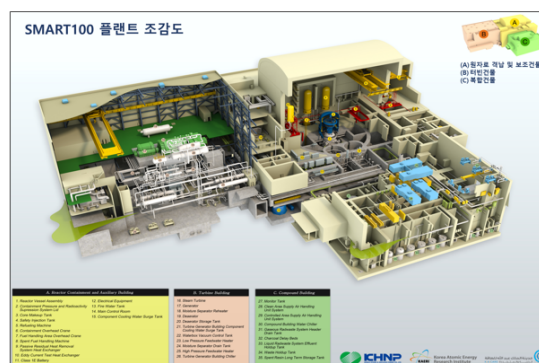
규제기관과의 안전성심사를 통해 원자력 시설 안전성에 대한 본격적인 심사

- (표준설계기술서) SMART100 표준설계안전성분석보고서에 기술된 내용과 일치하며, 설계 내용에 정의된 중요 설계특성 및 성능을 확인할 수 있도록 적합한 방법이 설계·시공·성능 검증계획(ITTAC)에 제시된 것으로 검토
- (표준설계안전성분석보고서) 총18장으로 구성되어 있으며, 발전소 일반사항부터 사고분석까지 원자력시설의 안전에 관한 사항이 정리된 인허가 대표 문서로 각 장, 절의 인허가 요건을 모두 적합하게 만족하고 있는 것으로 검토
- (사고관리계획 작성계획서) 사고관리 개요, 사고관리능력의 평가 및 비상운전절차서 작성계획에 관한 사항을 원안위 고시에 만족하도록 작성하였음. 사고관리목록은 구체적으로 분류되었으며, 사고관리 전략에 포함된 설비의 기능 등이 적합하게 기술

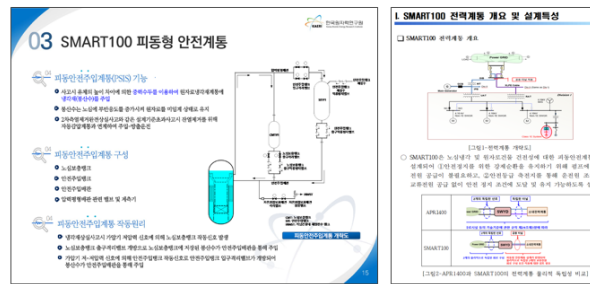
기관	질의수	답변접수	답변제출	Ratio	잔여
KAERI	1,441	1,441	1,441	100.0%	0
AE	902	902	902	100.0%	0
KNF	104	104	104	100.0%	0
KHNP	94	94	94	100.0%	0
SD	62	62	62	100.0%	0
DOOSAN	18	18	18	100.0%	0
합계	2,621	2,621	2,621	100.0%	0



- (사전설명회) 표준설계인가 제도 및 SMART100 표준설계에 대한 안전전문위 위원들의 이해를 도모하기 위해 규제기관·신청기관에서 사전설명회 개최
- (실무검토회의) SMART100 주요 설계특징인 피동형 안전계통 및 전력계통에 대한 실무위원 검토회의를 구성하여 집중적인 검토 회의체 운영
- (심사결과보고) 규제기관 본심사가 종료된 직후 안전전문위에 심사결과 보고



SMART100 플랜트 조감도



원안위 실무검토회의 (총2회) - 전력공급설비

RTNSS 목록	임무	적용기준
보조 격납건물살수계통	격납건물 장기냉각	라
다양성보호계통	정지불능예상과도 완화	가
비1E급 VBPSS	다양성보호계통 전력배분	가
안전주입탱크 재충수 계통	사고 발생 72시간 이후 냉각수 보충	나
보조디젤발전기	비상DC배터리재충전 및 안전주입탱크 재충수펌프에 전원공급(사고 발생 72시간 이후부터 7일까지)	나
비상냉각탱크 보충탱크	사고 발생 72시간 이후 냉각수 보충	나
주제어실 냉방	사고 발생 72시간 이후 냉방	나
계측장비기기실 냉방	사고 발생 72시간 이후 냉방	나
저압차단기반, 전동기제어반 및 절체스위치	사고 발생 72시간 이후 전력배분	나
안전급축전지실 환기	사고 발생 72시간 이후 환기	나
보조디젤발전기실 냉방	사고 발생 72시간 이후 냉방	나
회수관 및 회수관 격리밸브	격납건물 압력 장기저감	라

02 표준설계인가 획득

원안위는 SMART100이 원자력안전법 제12조 제5항의 표준설계 인가기준에 부합함을 확인

이에 원안위는 '24년 9월 26일 SMART100에 대해 국내 4번째 '원자로시설 표준설계인가증'을 발급

참고자료

SMART100 표준설계인가 신청 현황

2024. 9. 26.

한국원자력연구원
한국수력원자력
한국전력기술

□ 피동형 공학적인전설비

○ 피동안전개념이 적용된 공학적인전설비는 ①피동안전주입계통, ②자동감압계통, ③피동잔열제거계통, ④격납건물압력감소방사능저감계통으로 총 4종이 있음

계통목록	주요기능	적용원리
피동안전주입계통	냉각재주입, 원자로냉각, 노심미입계	중력주입
자동감압계통	원자로 급속감압	압력차 방출
피동잔열제거계통	원자로 현열 및 노심 잔열제거	자연순환 냉각
격납건물압력감소방사능저감계통	격납건물 압력제한, 방사능물질 제거	압력차 방출, 자연순환 냉각

그림 4. 피동안전개념이 적용된 SMART100의 대표적인 공학적인전설비

V. 대표 사고해석

□ 소형파단냉각재상실사고(SBLOCA)

○ 소형파단냉각재상실사고 중 노심수위 관점에서 가장 제한적인 사고조건은 안전주입배관 50mm 양단파단이며, 사고과정 동안 원자로의 안전정지 과정은 다음과 같음

< 안전주입 배관 50mm 양단순시파단 사건경위 >

사고발생

① 사고로 인해 원자로냉각재계를 입력 급격히 감소
② 가압기 제압력 → 원자로냉각재계 및 노심보통냉각재계 (봉산수 주입으로 미입계유지 및 노심냉각)
③ 원자로냉각재계/노심보통냉각재계 전열상실 → 급수펌프동작
④ 급수 저유량 → 피동잔열제거계 작동 (노심잔열 및 원자로잔열 제거)
⑤ 안전정지조건 도달 (250C)
⑥ 가압기 자-제압력 → 안전주입탱크 작동 (봉산수 주입으로 미입계유지 및 노심냉각)

정지냉각 및 사고종결

⑦ 노심보통냉각재계 자수위 → 자동감압밸브 개방
⑧ 노심보통냉각재계 주입완료
⑨ 피동잔열제거계통으로 노심잔열제거 및 안전주입수 (봉산수에 의해 노심냉각 및 미입계 유지)
⑩ 72시간 동안 안전정지상태 이하를 유지
⑪ 72시간 이후 RINS급 기압으로 안전주입탱크 및 비상냉각탱크의 재충수 (장기간 안전정지 유지)
⑫ 사고 복구조치가 완료되면 정지냉각재계를 활용하여 상온정지에 도달 (사고종결)

그림 7. 안전주입배관 50mm 양단순시파단 사고대응 과정

원자로시설표준설계인가증

제 4 호

1. 법인명: 한국수력원자력(주), 한국원자력연구원, 사우디 왕립원자력신재생에너지원

2. 주소
- 한국수력원자력 : 경상북도 경주시 문무대왕면 불국로 1655
- 한국원자력연구원 : 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
- 사우디 왕립원자력신재생에너지원 : PM6H4X 12244 Al Olaya, Riyadh Kingdom of Saudi Arabia

3. 대표자
- 한국수력원자력 : 황주호 (생년월일: 1956.3.22.)
- 한국원자력연구원 : 주한규 (생년월일: 1962.11.12.)
- 사우디 왕립원자력신재생에너지원 : H.H. Dr. MAMDOOH AL SAUD (생년월일: 1973.12.31.)

4. 원자로의 명칭: 스마트100 (SMART100)

5. 종류: 일체형가압경수로

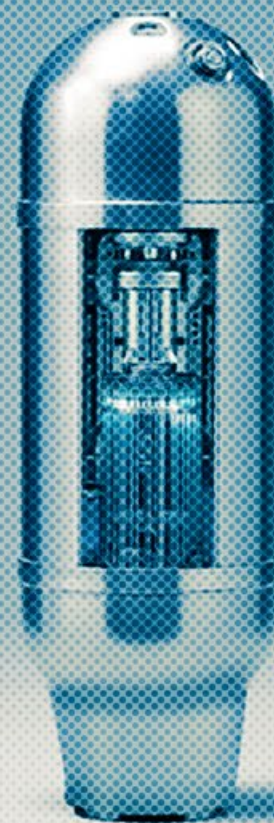
6. 용량: 365 MWt
위와 같이 「원자력안전법」 제12조, 같은 법 시행령 제22조제1항 및 같은 법 시행규칙 제9조에 따라 원자로 및 관계시설의 표준설계를 인가합니다.

2024년 9월 26일

원자력안전위원회

CONTENTS

- 01 SMART 개발 배경 및 과정
- 02 SMART100 표준설계인가
- 03 SMART100 원자로
- 04 의미 및 시사점



03 SMART100 개발 배경



개발목적

01 차세대 수출형 모델 개발

Proven Tech.

- 검증된 대형 경수로 기술을 최대한 활용

License

- 표준설계를 통해 건설, 운영, 인허가 리스크를 최소화

SMR

- 2020년대 글로벌 에너지 시장 진출할 수 있는 소형 모듈 원자로



개발방향

02 일체형 원자로와 피동안전개념

Long-term

- 후쿠시마 사고와 같은 상황에서도 외부자원 없이 장시간 안전성 확보

No AC Power

- 소외전력 공급에 제약이 있는 열악한 부지 환경에서도 건설성, 운영성 확보

Passive System

- 교류전원에 의존하지 않고 자연력만으로 작동하는 피동안전계통 도입



설계전략

03 “입증된 기술”을 바탕으로 “혁신기술”을 조화롭게 적용

안전성

- 일체형 원자로=LBLOCA 원천 제거 / 피동안전계통=교류전원 및 운전원 조치 불필요

경제성

- 소규모 전력시장 및 비전력 분야의 화석에너지원 대비 경제성 우위

활용성

- 다양한 분야(해수담수화, 지역난방, 공정열공급 등) 활용 / 도시근교 또는 산업단지 건설

03 SMART100 안전목표

방사선 위험으로 부터 인간과 환경을 보호



방사성물질
유출 제어

+



노심 및
방사선원
제어

+



사고결말
완화

안전목표1

- ✓ $1.0E-7$ /RY 이하
- ✓ 대량조기방출빈도 $1.0E-8$ /RY 이하
- ✓ 총유효선량 250 mSv 이하
- ✓ 세습방출량 100 TBq 초과총빈도 ($1.0E-7$ /RY 이하)

안전목표2

- ✓ 설계기준사고시 운전원조치 없이 36시간 이내에 안전정지조건 (215°C) 이하로 냉각
- ✓ 72시간 동안 안전정지조건 이하에서 노심이 손상되지 않는 상태로 유지

안전목표3

- ✓ 소내 및 소외의 모든 교류전원이 상실되는 상황에서도 정량적 안전목표2 만족

안전목표4

- ✓ 원자로 용기를 관통하는 가장 큰 배관의 양단 파단 시에도 노심손상이 발생하지 않도록 유지

정성적 안전 목표의 달성여부를 평가하기 위한 정량적 척도로서 확률론적안전성평가 방법과 피동안전개념에 기초하여 4가지 정량적 안전 목표를 수립

03 SMART100 설계철학

01 (다중방벽) 방사성 물질의 유출을 방지하고 방사선 피폭으로부터 대중과 환경을 보호



다중방벽	대표 구조물	대형원전	SMART100	비고
제1방벽	• 핵연료 펠릿	• 펠릿	• 펠릿	• 동일
제2방벽	• 핵연료 피복재	• Zirlo	• HANA-6	• 동등이상
제3방벽	• 원자로냉각재압력경계	• 루프형	• 일체형	• 동등이상
제4방벽	• 격납건물 (라이너 플레이트)	• 있음	• 있음	• 동일
제5방벽	• 격납건물 (철근 콘크리트)	• 있음	• 있음	• 동일


02 (심층방어) 다중방벽의 구조적 건전성을 유지하고, 사고조건으로 진전되지 않도록 발전소 상태를 제어




심층방어	목표 및 기능	SMART100
1단계	• 정상상태 유지	• 보수적 설계, 품질보증, 예방정비
2단계	• 비정상상태로 유지	• 제어, 감시, 보호설비
3단계 3a	• 설계기준 범주로 제어	• 피동형 공학적안전설비, 비상운전절차서
3단계 3b	• 노심용융 방지를 위한 설계확장조건으로 제어	
4단계	• 중대사고 조건의 제어	• 격납건물, 사고관리절차서
5단계	• 소외 비상대응	• 제한구역, 비상대책

03 SMART100 필수안전기능

03 (안전설계특성) 다양성, 다중성, 독립성, 고장-안전성, 고유안전성 등의 안전개념을 주요 구조물, 계통, 기기에 적용

 다중성, 다양성	설계특성	구현방법	SMART100	비고
	다중성	• 단일고장 대응	• 다중계열 구비	최소 필수 요건
	다양성	• 작동원리가 다른 기기 적용	• 밸브 구동자 (MOV, AOV...)	
	독립성	• 전기적, 물리적 분리	• 다중계열 별 분리	자발적 설계사항
	고장-안전성	• 고장시 안전에 유리한 상태로 작동	• 고장시 안전위치 (FO, FC, FAI)	
	고유안전성	• 안전에 유리한 상태로 스스로 거동	• 반응도 궤환효과	

04 (사고저항성) 사고발생원 원천적 제거, 사고가 발생하더라도 더욱 심각한 상태로 진전되지 않도록 설계

 사고 저항성	SMART100	설계 원리
	• 일체형 원자로	• 대형냉각재파단사고를 원천적으로 차단함
	• 낮은 핵연료 열속	• 핵연료 건전성 확보에 유리함
	• 풍부한 원자로 냉각재 재고량	• 노심 노출을 방지하는데 유리함
	• 캔드모터 원자로 냉각재펌프	• 주요 누설경로를 원천적으로 차단함

03 Top-down Approach

안전
목표

안전
전략

필수
안전
기능

피동
안전
계통

방사성물질 외부 유출 방지

핵연료 및 피복재 보호

원자로냉각재계통 보호

격납건물 보호

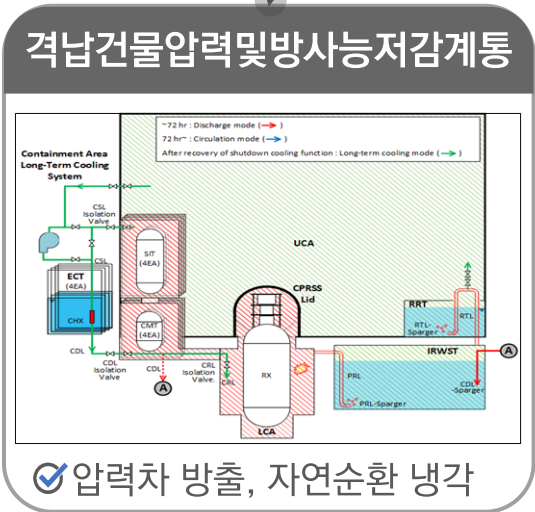
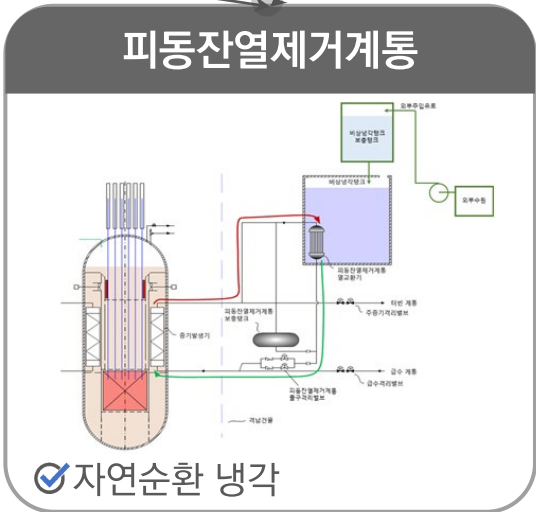
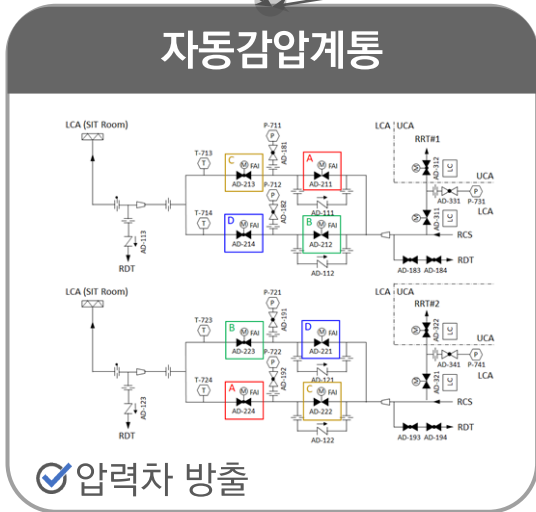
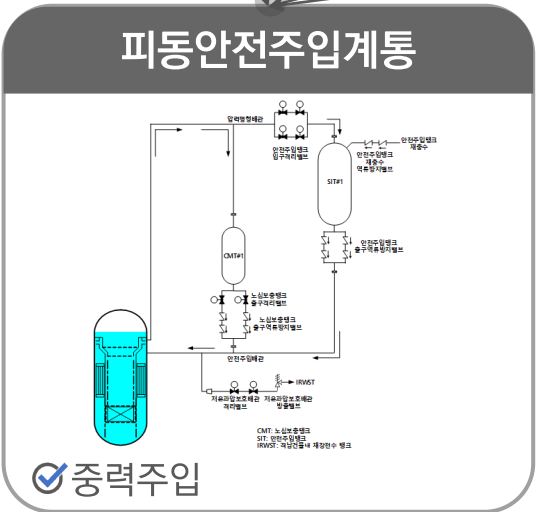
노심미임계 유지

노심냉각 및 열제거원 확보

원자로 냉각재 보충

원자로냉각재 압력경계 유지

격납건물 건전성 유지



03 일체형 원자로와 피동안전계통

- 기존 대형 경수로의 한계 극복 (노심손상방지 관점에서...)

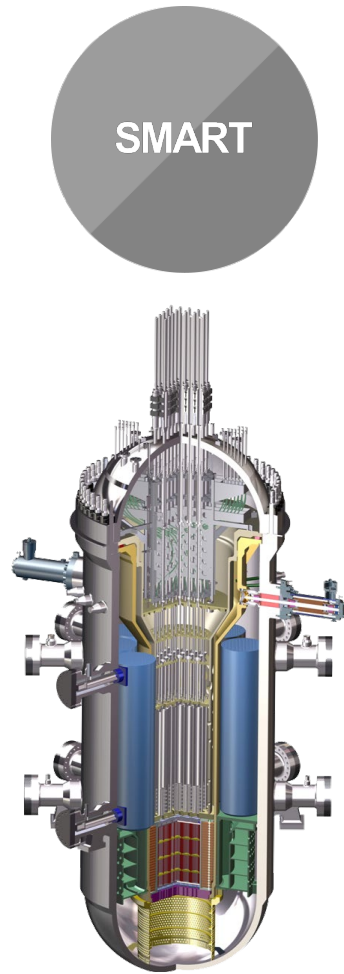


대형배관파단 냉각재상실사고 (LBLOCA)



발전소정전사고 (SBO)

03 SMART vs SMART100



SMART

• SMART •

330 MWt

100 MWe

가압경수형

일체형

36개월

단일 나선행

부분피동¹⁾

비상디젤발전기

교류전력 + 자연력

30분

$< 1.0 \times 10^{-6} / \text{RY}$

돔형/실린더



열 출력

전기출력

원자로 형식

원자로 구성

재장전 주기

증기발생기 형식

안전계통

비상전력

안전기능 구동력

운전원 조치 여유시간

노심손상빈도
(내부사건/전 출력)

격납건물

• SMART100 •

365 MWt

110 MWe

가압경수형

일체형

30개월

단일 나선행

완전피동²⁾

축전지

직류전력 + 자연력

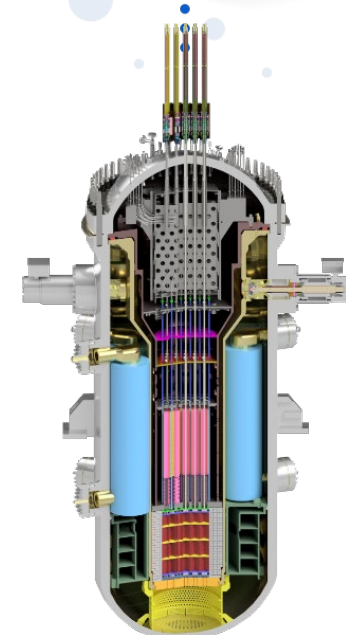
72시간

$< 1.0 \times 10^{-7} / \text{RY}$

아차형/사각



SMART100



1) 능동형: 안전주입계통, 안전감압계통, 격납건물살수계통 / 피동형: 피동잔열제거계통

2) 피동형: 피동잔열제거계통, 피동안전주입계통, 자동감압계통, 격납건물압력및방사능저감계통

03 원자로계통 (I)

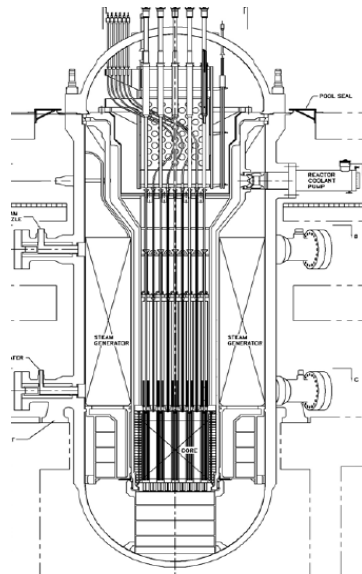
01 원자로용기

압력 경계

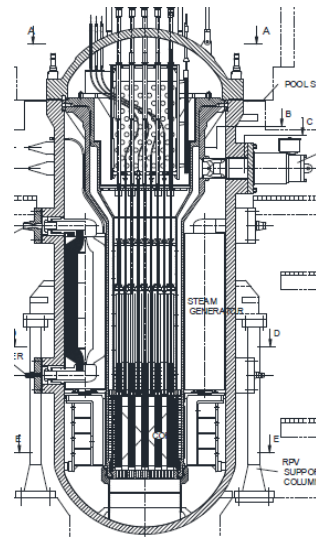
- 원자로 용기는 원자로냉각재 압력경계를 구성하는 설비로서 4. 년 설계수명 동안 건전성을 확보 하면서 방사성 물질의 외부누출을 차단하는 물리적 방벽 역할을 수행하도록 설계됨

산업 표준

- 원자로냉각재 압력경계를 이루는 기계적 부분은 원자로냉각재 계통의 설계압력을 적용하며* **KEPIC MNB(또는 ASME Sec. III MB)** 기준에 따라 설계함



SMART



SMART100

Parameter	SMART	SMART100	Modification Status
Outer Diameter	about 6 m	about 6 m	None
Inner Diameter	about 5 m	about 5 m	None
Height	about 18 m	about 16 m	Reduced (-2m)

03 원자로계통 (II)

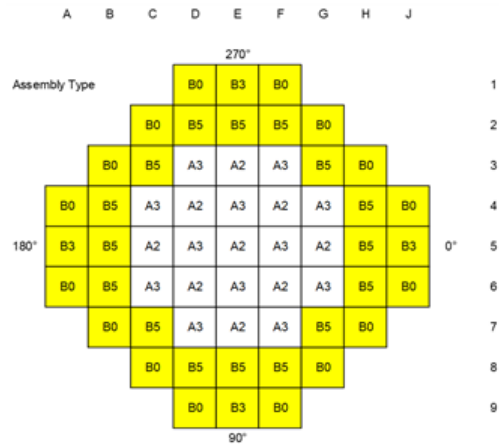
02 노심설계

열출력

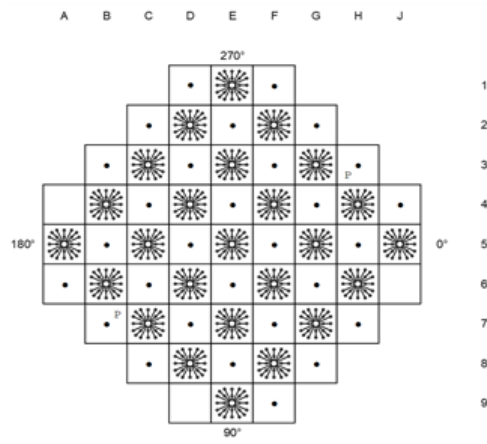
- SMART100은 SMART(330MWt) 대비 10% 증가한 열출력(365MWt)을 가지며, 핵설계는 KAERI에서 자체 개발한 DeCART2D/MASTER 전산프로그램으로 수행되었음. (* SMART SDA : CASMO-3/MASTER)

노심 특성

- 국내 상용 가압경수로 비교하여 물리적 크기가 작고 핵연료 농축도 및 핵연료 배치전략 등에서 차이가 있으나, 핵연료 연소 특성과 관련된 물리적 현상 및 제어 방식에서 기존 경수로와 큰 차이를 보이지 않음



Fuel Loading Pattern of Initial Cycle



Control Rod Assembly and In-Core Instrumentation

Fuel Rod Parameter	Large PWR	SMART	SMART100
Enrichment* (wt% U-235)	4.50	4.88	4.72
Avg. Linear Power Density(W/cm)	~179	~107	~119

* Based on highest enrichment among the fuel rods in the equilibrium cycle

03 원자로계통 (III)

03 원자로냉각재계통

일체형원자로

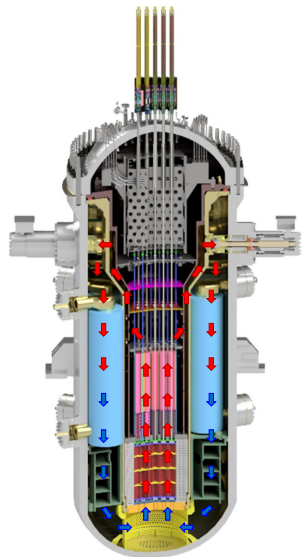
- 증기발생기* 원자로냉각재펌프* 가압기와 같은 주요기기를 단일 용기에 설치함으로써 가장 심각한 사고 중 하나인 대형냉각재상실사고 발생 가능성을 원천적으로 배제

원자로냉각재펌프

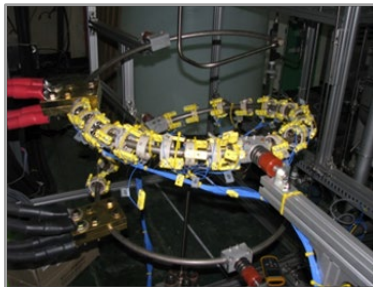
- 캔드모터(**canned motor**) 형식으로 기계적 밀봉장치가 적용되지 않으므로 펌프 축 누설 사고 발생 가능성을 원천적으로 배제

증기발생기

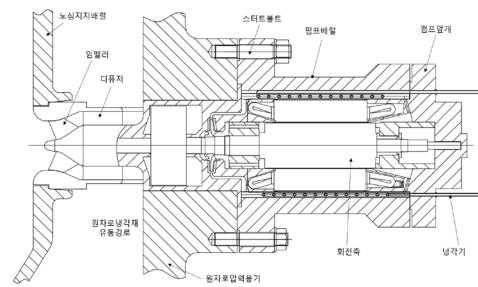
- 열출력 밀도와 기기배치 유연성을 높이기 위해 적합한 관류식 나선형으로 설계되었고* 충분한 과열도를 가진 증기를 생산하여* 증기의 순도를 높이기 위한 별도의 장치&습분분리기'없이 양질의 증기를 2차계통에 공급



Reactor Coolant System



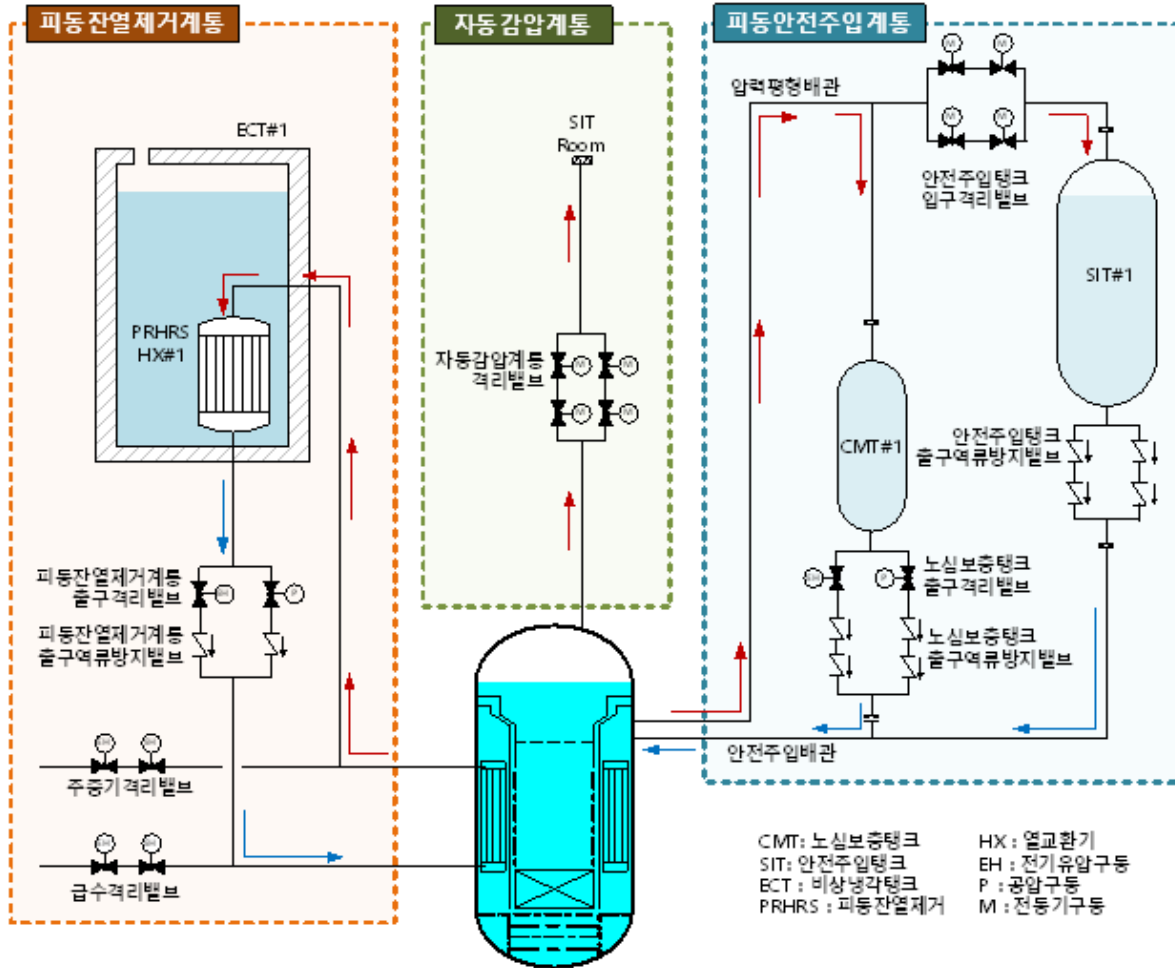
Once-through Helical Coiled Steam Generator



Canned Motor Reactor Coolant Pump

Parameter	Large PWR	SMART100
Design Pressure	17.2 MPa	17.0 MPa
Operating Pressure	15.5 MPa	15.0 MPa
Core Inlet Temp.	291 °C	295.5 °C
Core Outlet Temp.	324 °C	322.0 °C
Coolant Flow Rate	75.6×10^6 kg/hr	9.025×10^6 kg/hr

03 NSSS 공학적안전설비

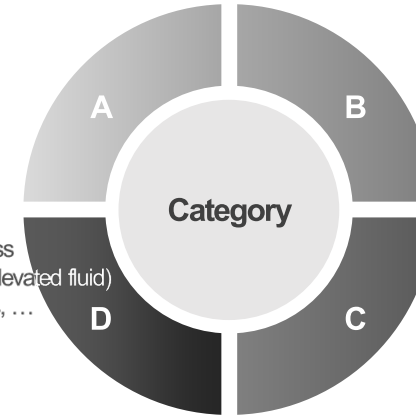


- ✓ No signal inputs
- ✓ No external power source or forces
- ✓ No moving mechanical parts
- ✓ No moving working fluid

: Fuel Cladding, Reactor Vessel

- ✓ Signal inputs to initiate passive process
- ✓ Energy from stored source (battery, elevated fluid)
- ✓ Active component are limited controls, ...
- ✓ Manual initiation is excluded

: Passive Safety Systems



- ✓ No signal inputs
- ✓ No external power source or forces
- ✓ No moving mechanical parts; but
- ✓ Moving working fluid

: Natural Circulation

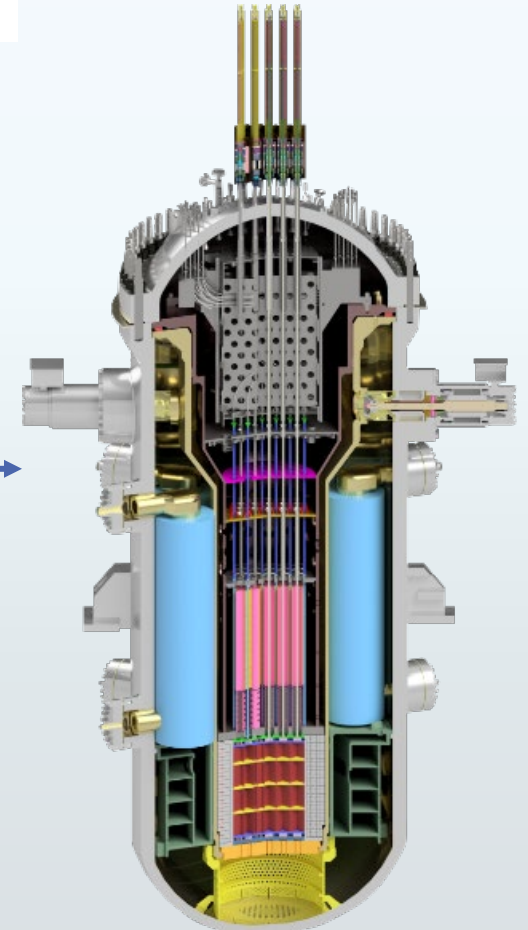
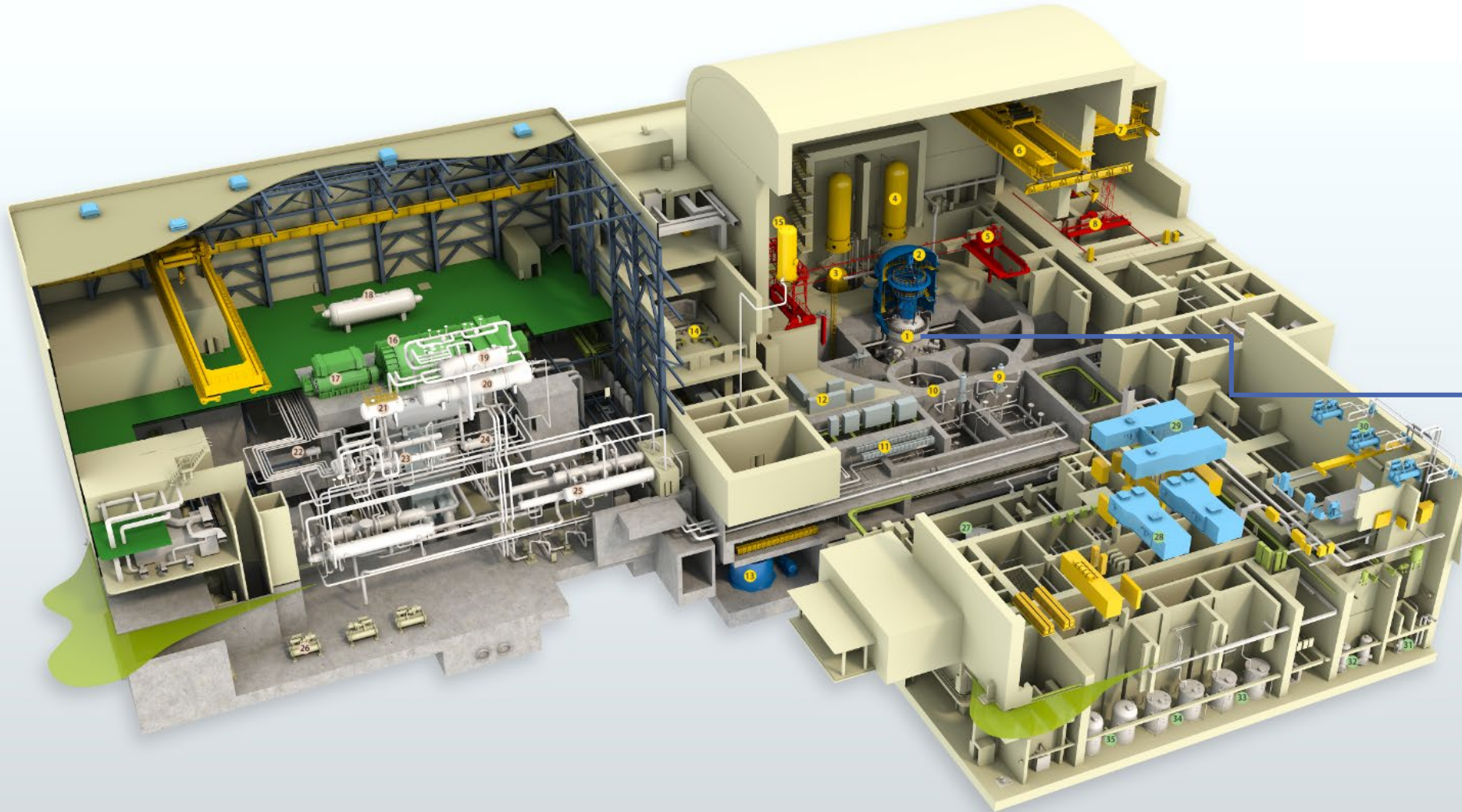
- ✓ No signal inputs
- ✓ No external power source or forces; but
- ✓ Moving mechanical parts, whether or not
- ✓ Moving working fluid

: Safety Valve, Check Valve

계통목록	주요기능	작동원리
피동안전주입계통	냉각재주입, 원자로냉각, 노심미임계	중력주입
자동감압계통	원자로 급속감압	압력차 방출
피동잔열제거계통	원자로 현열 및 노심 잔열제거	자연순환 냉각
격납건물압력및 방사능저감계통	격납건물 압력제한, 방사성물질 제거	압력차 방출, 자연순환 냉각

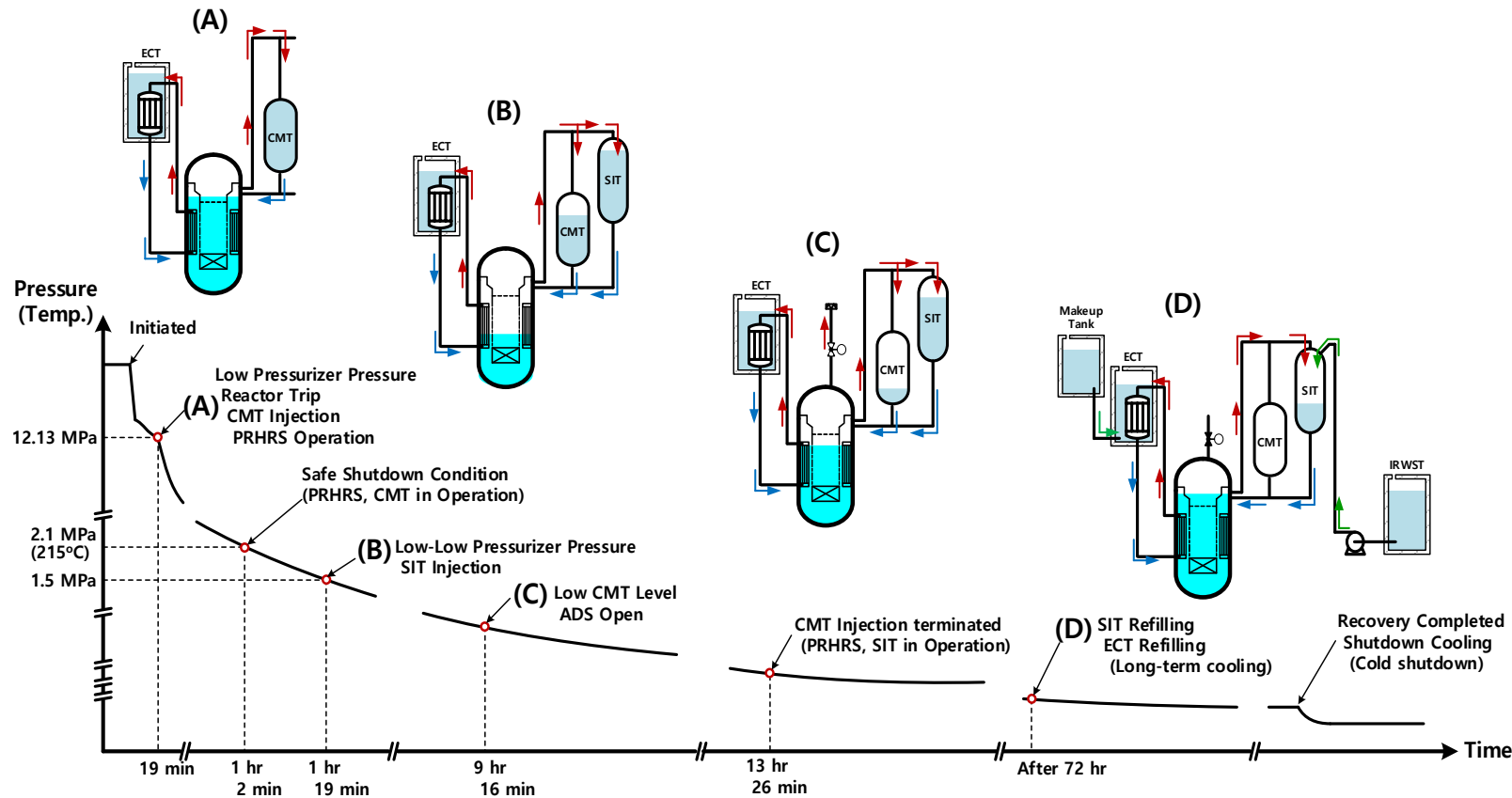
03 일체형 원자로 + Passive Safety System

SMART100



03 Passive Safety System (I)

01 SBLOCA Scenario



Scenario

Accident initiated *

- ① RCS pressure rapidly decreases
- ② Low pressurizer pressure ► RX/TB trip, CMT injection (maintain core cooling and sub-critical by borated water)
- ③ Loss of AC power ► Feedwater pump stop
- ④ Low feedwater flow ► PRHRS operation
- ⑤ Cooldown to safe shutdown (215°C) within 36 hours

After safe shutdown condition

- ⑥ Low-Low pressurizer pressure ► SIT injection (maintain core cooling and sub-critical by borated water)
- ⑦ Low CMT level ► ADS valve open
- ⑧ CMT injection terminated
- ⑨ Maintain safe shutdown condition for 72 hours

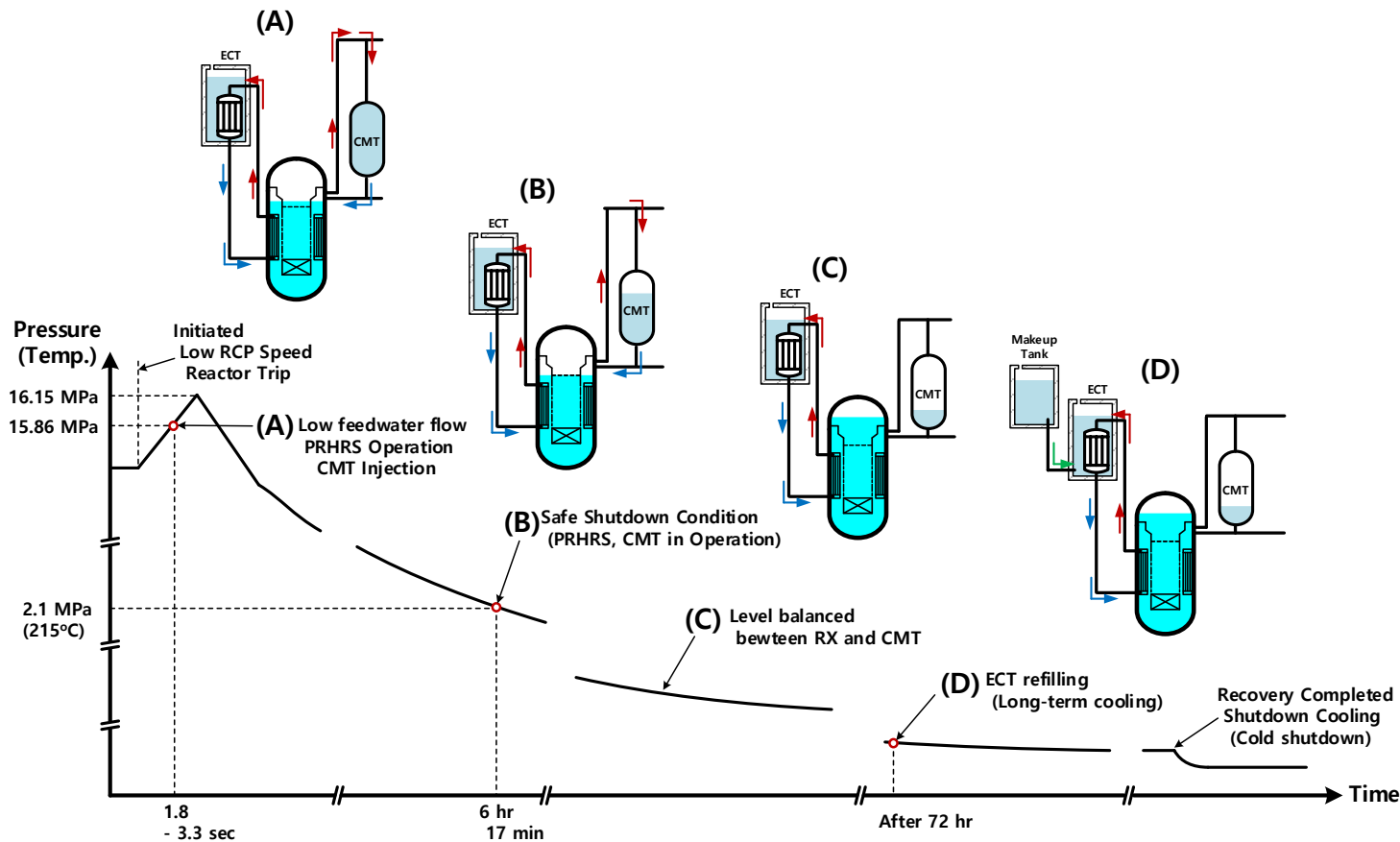
Long-term cooling & Recovery

- ⑩ Refill SIT and ECT after 72 hours
- ⑪ Recovery completed ► shutdown cooling
- ⑫ Cold shutdown (completed)

* Safety injection line (50 mm) double-ended break

03 Passive Safety System (II)

02 Non-LOCA Scenario



Scenario

Accident initiated *

- ① RCP flowrate rapidly decreases
- ② Low RCP pump speed ► RX trip
- ③ Loss of heat removal ► RCS pressure & temp. increases
- ④ Low feedwater flow ► PRHRS operation ► CMT injection (maintain core cooling and sub-critical by borated water)
- ⑤ Cooldown to safe shutdown (215°C) within 36 hours

After safe shutdown condition

- ⑥ PRHRS, CMT in operation (maintain core cooling and sub-critical by borated water)
- ⑦ Maintain safe shutdown condition for 72 hours

Long-term cooling & Recovery

- ⑧ Refill ECT after 72 hours
- ⑨ Recovery completed ► shutdown cooling
- ⑩ Cold shutdown (completed)

* Loss of Off-site Power (LOOP)

03 안전정지/피동형원전

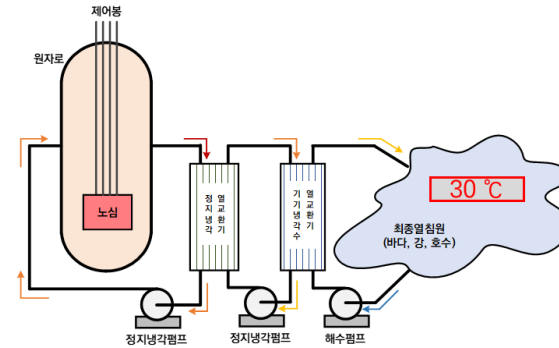
안전정지 달성방안

- (능동형 안전계통) 외부전력 및 복잡한 기계장치(예: 펌프, 디젤발전기)에 의존하여 안전정지 기준을 만족시키는 설계로, 해수나 냉각탑을 최종열침원으로 사용
- (피동형 안전계통) 외부전력에 의존하지 않고 밸브개폐 정도의 단순한 작동만으로도 자연력에 의해 안전정지 기준을 만족시키는 설계

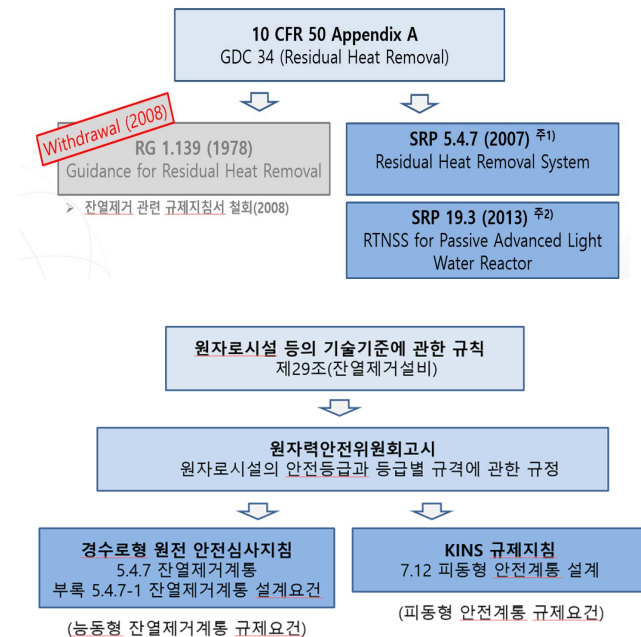
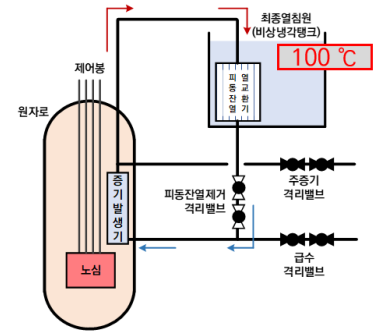
관련 규제

- (美 원자력규제위원회(NRC)) 기존의 규제지침서(RG 1.139)를 공식 철회하고, 능동형 잔열제거와 피동형 잔열제거의 분리된 규제체계로 정비
- (한국원자력안전기술원) 능동형 원전의 규제체계인 안전심사지침을 유지하면서, 피동형 안전계통 설계에 대한 내용(규제입장, 용어 정의, 허용 기준 등)을 정리하여 규제지침으로 새롭게 제정

능동형 (상용원전)



피동형 (SMART100)



03 안전정지

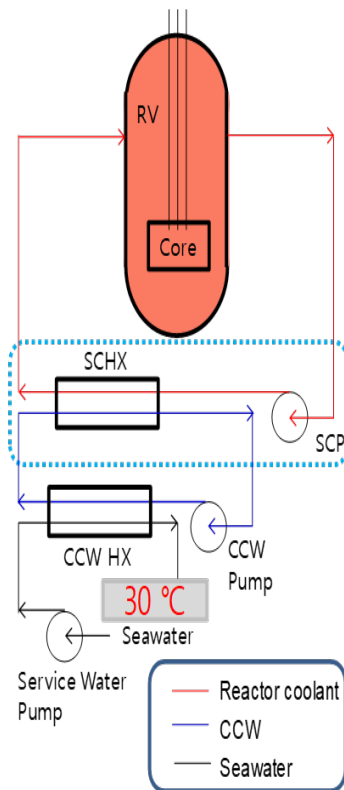
국내 안전심사지침 및 가압경수로 설계

◆ 경수로형 원전 안전심사지침 부록 5.4.7-1

[주 1 : 냉각에 포함된 과정은 열제거, 감압, 유량 순환 및 반응도 제어가 있다. 저온정지 조건은 기술지침서에서 제시된 바와 같이 가압경수로형 원전의 경우 미임계 상태로 원자로의 온도는 93.3°C(200°F) 이하이다.]

◆ 국내 가압경수로 설계

- 정지냉각계통(SCS)은 정지냉각펌프 및 기기냉각수펌프로 기기냉각수 및 **최종열제거원인 해수(30°C)**를 순환시켜 원자로를 냉각시킴
- RCS의 열이 해수까지 전달되는 동안 각 계통의 냉각수는 능동형 펌프에 의해 순환/냉각되므로, RCS는 저온정지온도(93°C) 까지 냉각될 수 있음

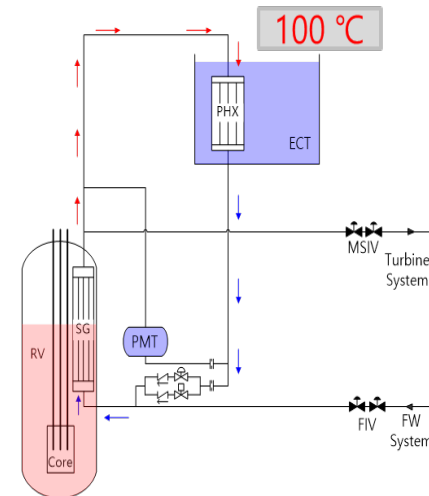


- 즉, 국내 가압경수로로는 능동형 펌프와 해수(30°C)를 이용하여 잔열을 제거하고 저온정지온도 이하로 냉각하도록 설계되었음

KINS 규제지침 및 SMART100 설계

◆ KINS 규제지침 7.12

- 상온정지 모드만 안전정지 상태를 구성하는 유일한 조건은 아니며, 충분한 시간 동안 원자로 미임계와 원자로심 잔열제거 기능 및 방사성물질의 격납기능이 유지되는 상태를 안전정지 상태로 판단 가능
- 피동형 잔열제거계통이 적용된 원자로시설의 경우, 안전등급의 피동형 잔열제거계통으로 냉각하여 충분한 시간 동안 상기의 상태를 유지할 수 있는 모드를 **안전정지** 상태로 정할 수 있음



◆ SMART100 설계

- 피동잔열제거계통(PRHRS)은 증기발생기와 **최종열제거원인 비상냉각탱크(100°C)**내 설치된 열교환기로 연결되는 페루프내 자연순환으로 원자로를 냉각시킴
- 페루프내 냉각수는 증기발생기에서 비등하고, 열교환기에서 응축되며, 증기발생기와 열교환기 높이차를 이용한 2상유동 자연순환으로 원자로를 냉각시킴
- 피동형 원전의 원리적 차이로 인해 최종열제거원 온도(100°C) 이하로는 냉각할 수 없음

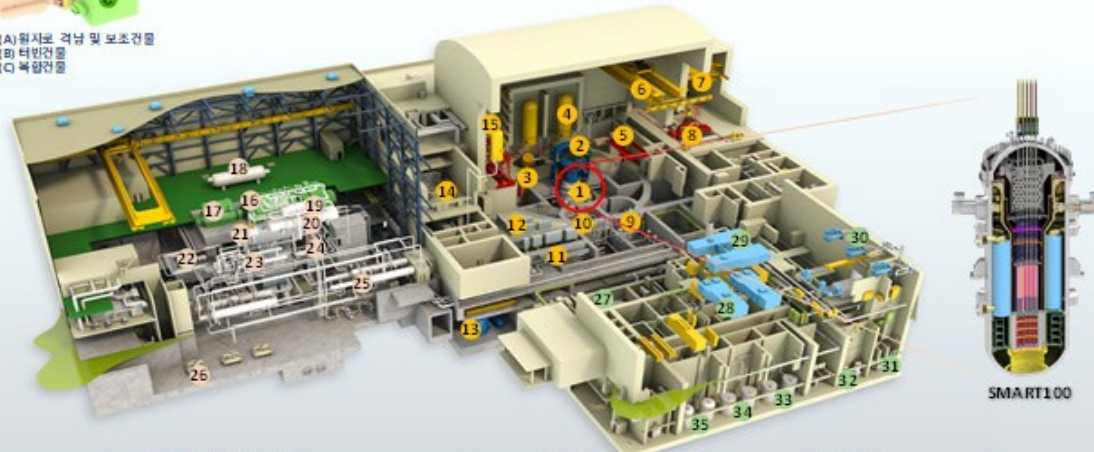
- 즉, SMART100은 자연순환과 상압의 비상냉각탱크(100°C)를 이용하여 잔열을 제거하고 안전정지조건 이하로 냉각하도록 설계되었음

03 원자로 격납 및 보조건물

■ SMART100은 구조적으로 원자로건물과 보조건물이 통합된 ‘원자로 격납 및 보조건물(RCAB : Reactor Containment and Auxiliary Building)’ 설계로 안전성과 경제성을 확보

- 격납건물상부와 하부영역을 형성하는 구조물은 철근콘크리트 구조물로서 안전성관련 기초슬래브에 의해 지지되며, 압력경계 내측면은 누설 방지를 위해 강재 라이너 플레이트로 피복

(A) 원자로 격납 및 보조건물
(B) 터빈건물
(C) 복합건물



A. 원자로 격납 및 보조건물			B. 터빈건물		C. 복합건물
1. 원자로집합체	11. 1E급 축전지	16. 증기터빈	27. 감시탱크	31. 기체방사성폐기물계통 오관 배수탱크	27. 감시탱크
2. 격납건물압력및방사능저감계통	12. 전기기기	17. 발전기	28. 청정구역 공기조화기	32. 일산화탄소검출기	28. 청정구역 공기조화기
3. 노심보통탱크	13. 소화용수저장탱크	18. 습분분리기 재열기	29. 관리구역 공기조화기	33. 액체방사성폐기물 유출물 수용탱크	29. 관리구역 공기조화기
4. 안전주입탱크	14. 주채어일	19. 탈기	30. 복합건물 냉각기	34. 폐기물저장탱크	30. 복합건물 냉각기
5. 핵연료재정환기	15. 1차측기전냉각수 원충탱크	20. 탈기 저장탱크	31. 기체방사성폐기물계통 오관 배수탱크	35. 폐수지 강기저장탱크	31. 기체방사성폐기물계통 오관 배수탱크
6. 격납건물영역 천정크레인		21. 2차측기전냉각수 원충탱크	32. 일산화탄소검출기		32. 일산화탄소검출기
7. 핵연료재정환기 천정크레인		22. 수질전공제어탱크	33. 액체방사성폐기물 유출물 수용탱크		33. 액체방사성폐기물 유출물 수용탱크
8. 사용후연료취급기		23. 저장수상가열기	34. 폐기물저장탱크		34. 폐기물저장탱크
9. 파동전열저계통		24. 습분분리기 배수탱크	35. 폐수지 강기저장탱크		35. 폐수지 강기저장탱크
10. 비상냉각탱크 열교환기		25. 고압급수가열기			
		26. 터빈건물 냉각기			

■ SMART100 격납건물 종합누설률시험(ILRT)

■ 관련 요건

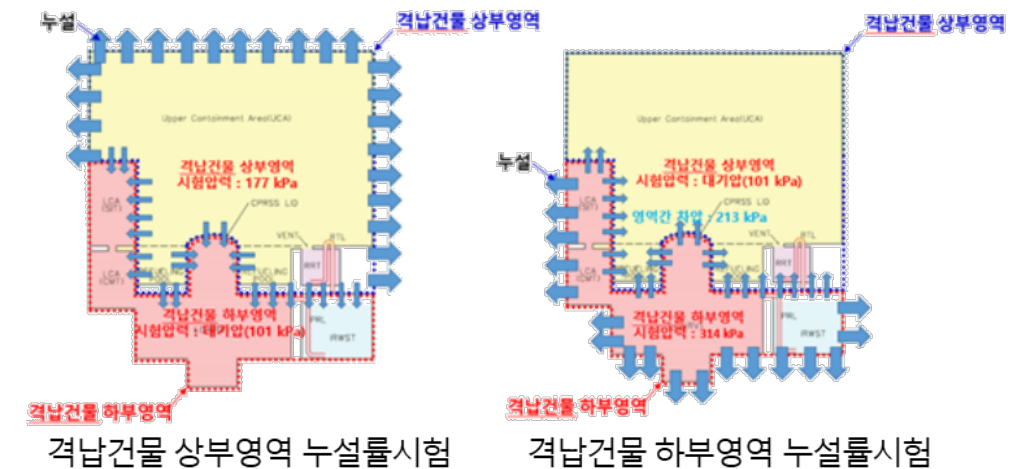
- 원자력안전위원회고시(원자로 25) “원자로격납건물 기밀시험에 관한 기준”
- 경수로형 원전 규제지침 제7.10절 “격납건물 누설률시험”
- 경수로형 원전 안전심사지침 제6.2.6절 “격납건물 누설시험”

■ 주요 검토 내용

- 시험압력 및 설정근거
- 시험압력이 부가되는 압력경계 및 시험체적
- 종합누설률시험 결과가 시험 기준에 부적합한 경우에 대한 추가시험 계획 등

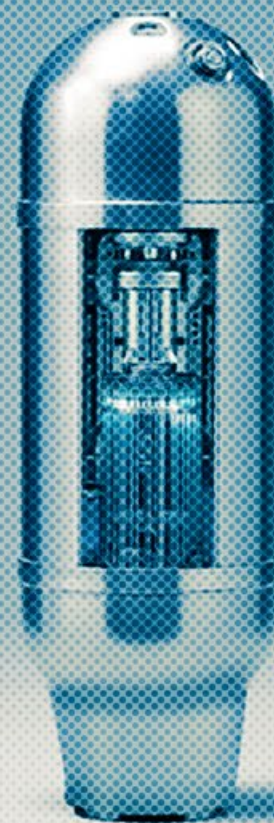
■ 최종 답변

- 종합누설률시험은 보수적으로 상부영역(UCA)과 하부영역(LCA)을 별도로 시험하고 합산하는 방식을 적용





CONTENTS

- 01 SMART 개발 배경 및 과정
- 02 SMART100 표준설계인가
- 03 SMART100 원자로
- 04 의미 및 시사점



04 SMART100 표준설계인가의 의미


국내 최초로 모든 안전계통이 피동형으로 설계된 SMR 표준설계인가 획득

-  모든 안전계통에 피동개념을 적용한 대한민국 최초의 원자로로서, 피동개념이 적용된 설계철학에 대해 국내 규제기준이 적용된 최초의 정식 인가 사례
-  규제기관과 연구·개발 기관 사이에서 방대한 기술적 논의를 통해 피동안전개념을 위한 새로운 규제체계가 정비 되었으며, 향후 후속노형을 위한 인허가기술 및 규제체계 적용 노하우를 축적


표준설계인가는 반복설계가 가능한 범위에 대해 안전성과 설계수준을 인가 받는 것으로, 세계 소형모듈원자로 시장진출 및 상용화의 가능성이 확대될 것으로 기대

향후 표준설계인가를 목표로 하는 후속 노형들(예: 혁신형 SMR 및 4세대 원전 등)에 예상되는 난관(현행 규제를 그대로 적용하지 못하는 설계개념이나 특성이 다수 발생)에서 신기술 개발 및 규제체계 적용의 의미 있는 길잡이가 될 것으로 기대

해외요건과 국내요건이 상충하는 경우

-  심사안건에 따라 해외 요건과 국내 요건이 상이하게 적용될 수 있음
 - 예시1 : NRC DG(Draft Guide) 방법론을 先적용할 것
 - 예시2 : NRC RG 개정본 보다 국내 기존 심사지침을 우선적으로 적용할 것

기존 국내외 규제 사례가 없는 새로운 설계개념

-  해외 유사 사례를 인용하더라도, 완전히 동일한 개념이 아니므로 설득력 저하
 - 신형 원자로의 경우, 동일한 설계 적용시 특허권 분쟁 리스크 증가

04 안전규제 체계 (Hierarchy)



- KINS 규제지침 7.12 (피동형 안전계통 설계) 신규로 제정하여 SMART100 심사에 활용함
- 피동안전계통 관련 KINS 안전심사지침 반영의 필요성
(예 : 안전정지vs저온정지, 선량평가방법, RTNSS 등)
- 장기적으로 국내외 규제환경 변화 및 피동형원전 특성을 고려한 안전규제체계 검토 필요

← KINS 규제지침 7.12 (피동형 안전계통 설계)

04 피동적 - “Passive”의 적절한 국문 표현은?

언어학 (Language)

被動 (피동, Passive Voice)

被 (입을 피), 動 (움질일 동), 態 (모습 태)



동작 또는 상태 변화를 입어
그로 말미암은 상황 또는
상태에 이름의 표현

(주체적 “동작” 보다는 “원인/과정 강화”)

예 : 이 책은 많은 사람들에게 읽혔다.

예 : 온도 차로 인해 자연순환 유동이 형성



주체가 스스로 행하거나
상태를 변화시키는 것이 아니라
외부의 요인에 의해 동작이나
상태 변화를 입게되는 것

(주체적 동작성 “약화 및 상실”)

예 : 포수의 실수는 결승전 승패를 갈랐다.

예 : 결승전은 포수의 실수로 인해 승패가 갈렸다.

예 : 사고는 피동안전계통에 의해 대처된다.

Passive(부정적 이미지) + Safety(안전성) → 복합명사화 되어 안전성(긍정적) 의미가 퇴색

04 피동적 - 다른 분야에서 사용하는 경우는 없을까?

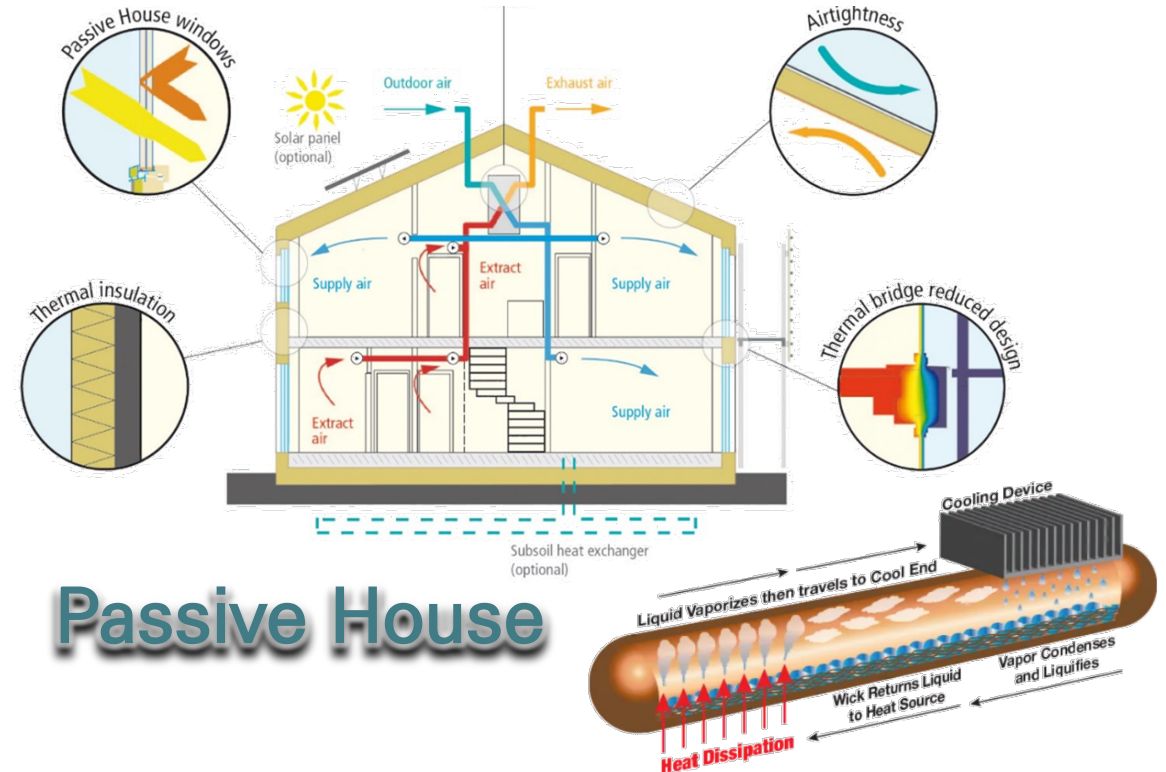
게임 (Game)

“MP소모”가 없으면서 사용자가
특별히 신경쓰지 않더라도 작동하는 기술



공학 (Engineering)

“전력소모”가 없으면서 사용자가
특별히 신경쓰지 않더라도 작동하는 설비

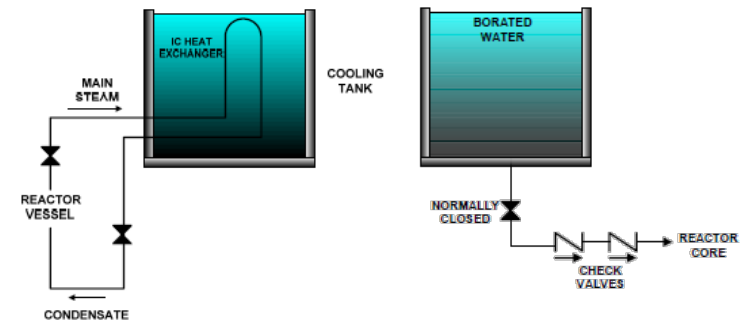


Passive House

04 피동적 - 기존 원자력 분야에서는?

에너지 저장 및 구동력 분류 (Energy Storages and Driving Forces)

- 중력 → Gravity (G)
- 자연순환 → Natural Circulation (N)
- 압력차 → Pressure (P)
- 압축기체 → Compressed (C)
- 저감수조방출 → Suppression Pool (S)
- 축압 → Accumulated (A)
- 배압 → Back Pressure (B)
- 온도차 → Temperature (T)
- 높이차 → Elevated (E)



Passive 국문 번역 (계통단위)

- 피동안전주입계통 (PSIS) → 중력안전주입계통 (GSIS, Gravity)
- 피동잔열제거계통 (PRHRS) → 자연순환잔열제거계통 (NRHRS, Natural circulation)
- 피동축매형수소재결합기 (PAR) → 자연축매형수소재결합기 (NAR, Natural circulation)

Passive 국문 번역 (대단위)

- 피동안전계통 (Passive Safety System) → 자연력안전계통, 내재력안전계통, 저장력안전계통, ...

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



경청해 주셔서 감사합니다.



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

제4차 원자력안전규제의 미래 워크숍

원자력 비발전 활용과 고온가스로 인허가 쟁점 및 해결 방안

2025. 12. 19.

김찬수 한국원자력연구원 고온원자로개발부 부장

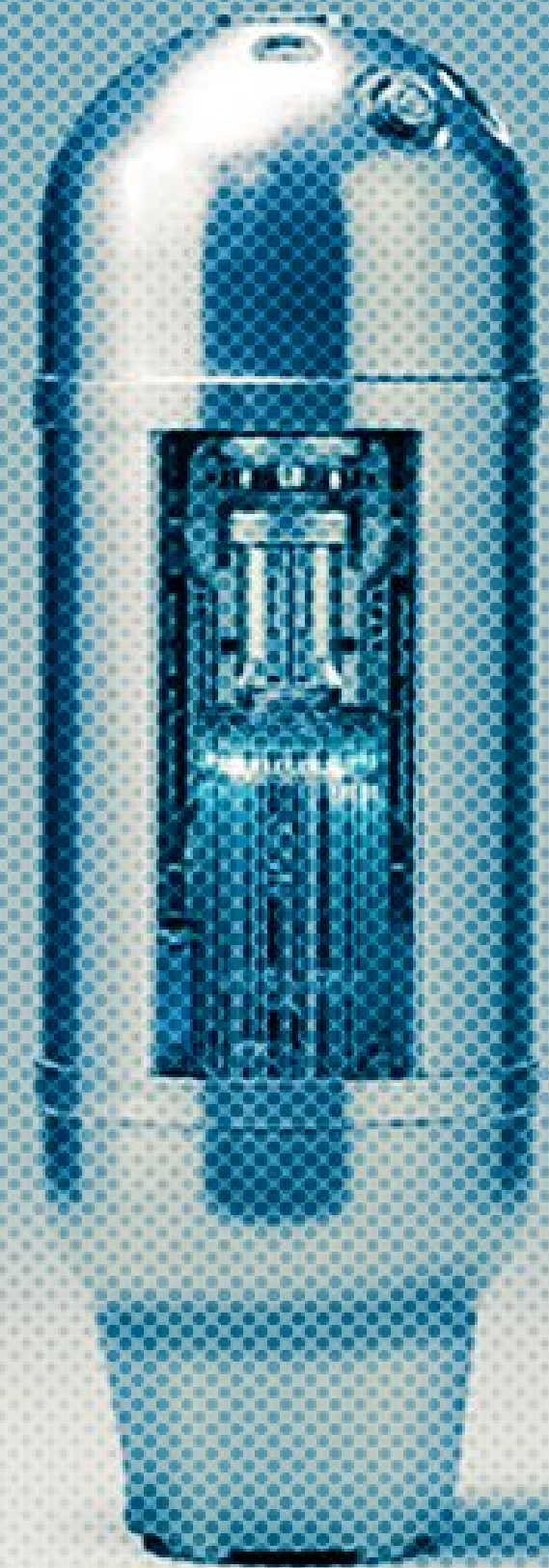
kcs1230@kaeri.re.kr



서울대학교 원자력정책센터
SNU Nuclear Energy Policy Center

CONTENTS

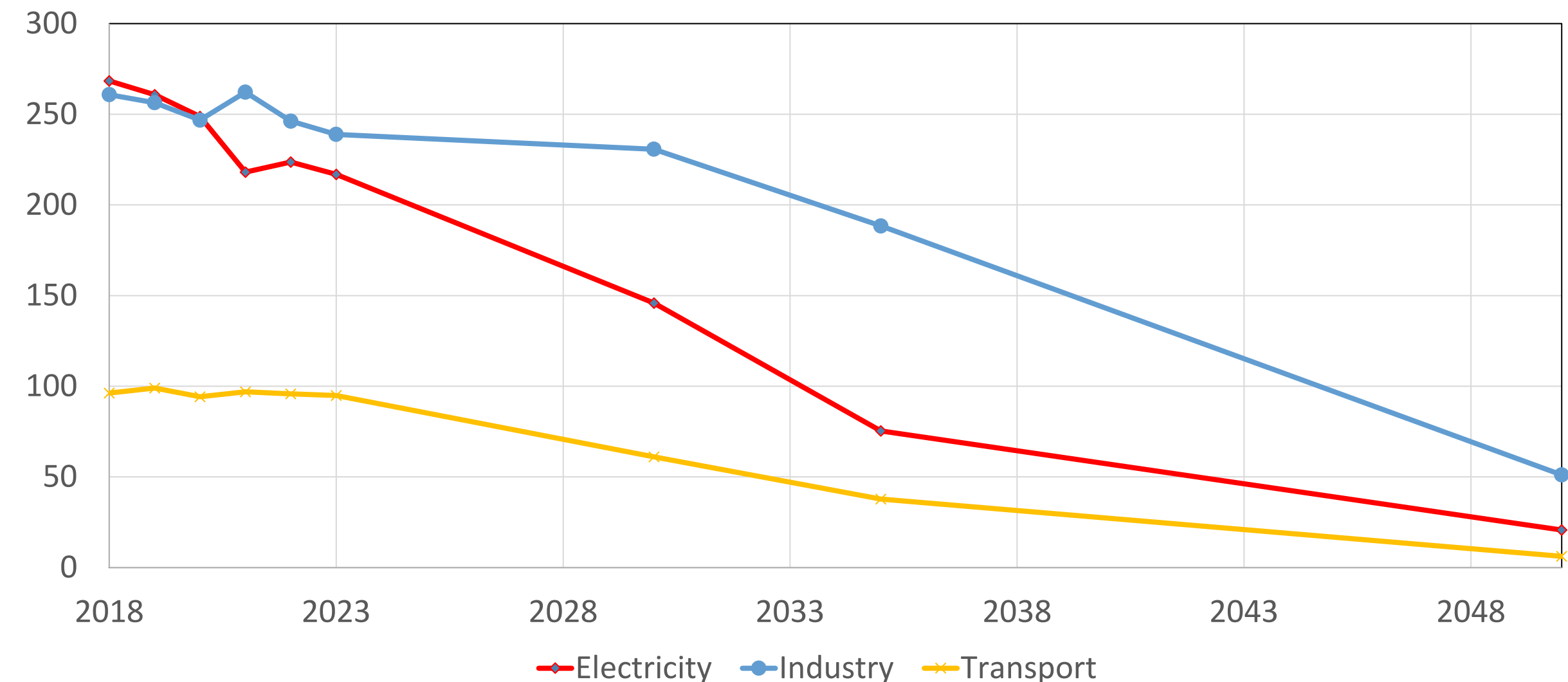
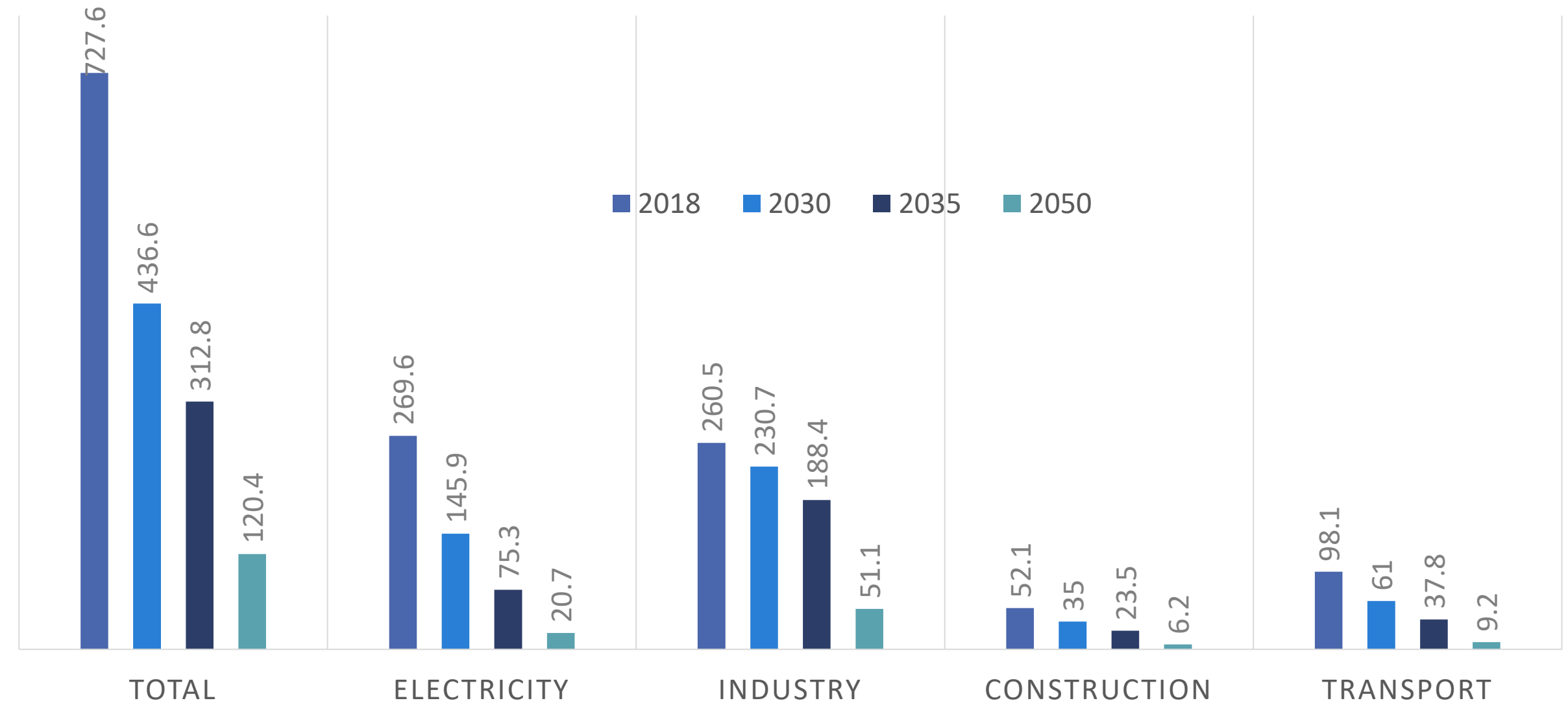
- I. 탄소중립과 원자력이용 확대 요구
- II. 원자력비발전활용 및 고온가스로 해외현황
- III. 원자력비발전활용 및 고온가스로 국내현황
- IV. 인허가 현안 및 해결 방향



01. 한국의 2030/2035 NDC와 2050 탄소중립 전망 (MtCO_{2eq}/yr)

주요 분야별 2030과 2035 NDC

- 전체 (40.0% → 53.1 ~ 61.0%)
- 발전 (45.9% → 68.8 ~ 75.3%)
 - 원전/신재생 확대 지속 추진
 - 물리적 한계로 여력 부재 우려
- 산업 (11.4% → 16.7 ~ 24.0%)
 - 높은 제조업 비중과 에너지 다소비 업종 위주
 - 탄소세와 인센티브
 - 연/원료 탈탄소, 전기화(발전 분야 부담 증가) 등
- 건물 (32.8% → 44.5 ~ 47.7%)
 - 제로에너지 빌딩 신축 및 그린 리모델링
 - 지역 난방 열공급 전기화 (발전 분야 부담 증가)
- 수송 (37.8% → 59.7 ~ 62.3%)
 - 친환경차, 내연차 연비 개선, 대중교통 활성화
 - 전기차 수요 감소 및 인센티브 축소



02. 글로벌 기업의 원자력 역할 확대 요구

Amazon, Google, Meta and Dow back goal to triple nuclear capacity

Wednesday, 12 March 2025

Tech giants and other major energy users Amazon, Google, Meta, Dow, Occidental, Allseas and OSGE have signed a pledge supporting the goal of at least tripling global nuclear capacity by 2050.

They also agree "that there is a significant role for nuclear technologies to provide generation for a wide range of economic activity, including the technology sector, increased electrification, the provision of high temperature industrial process heat, hydrogen production, district heating and the production of synthetic fuels" and "by ensuring that nuclear and other energy sources have equal access to finance, governments can enable nuclear capacity deployment at scale worldwide". It also calls "on other large energy user companies to join this pledge".



데일리한국

미국 청정에너지구매자연합, 무탄소 이니셔티브 참여

[데일리한국 안희민 기자] 한국의 무탄소연합(CF연합)이 새 우군을 맞이했다.산업통상자원부는 미국 청정에너지구매자연합(CEBA)가 CFE 이니셔티브에...

2025. 5. 8.



03. 원자력비발전활용 국제협력

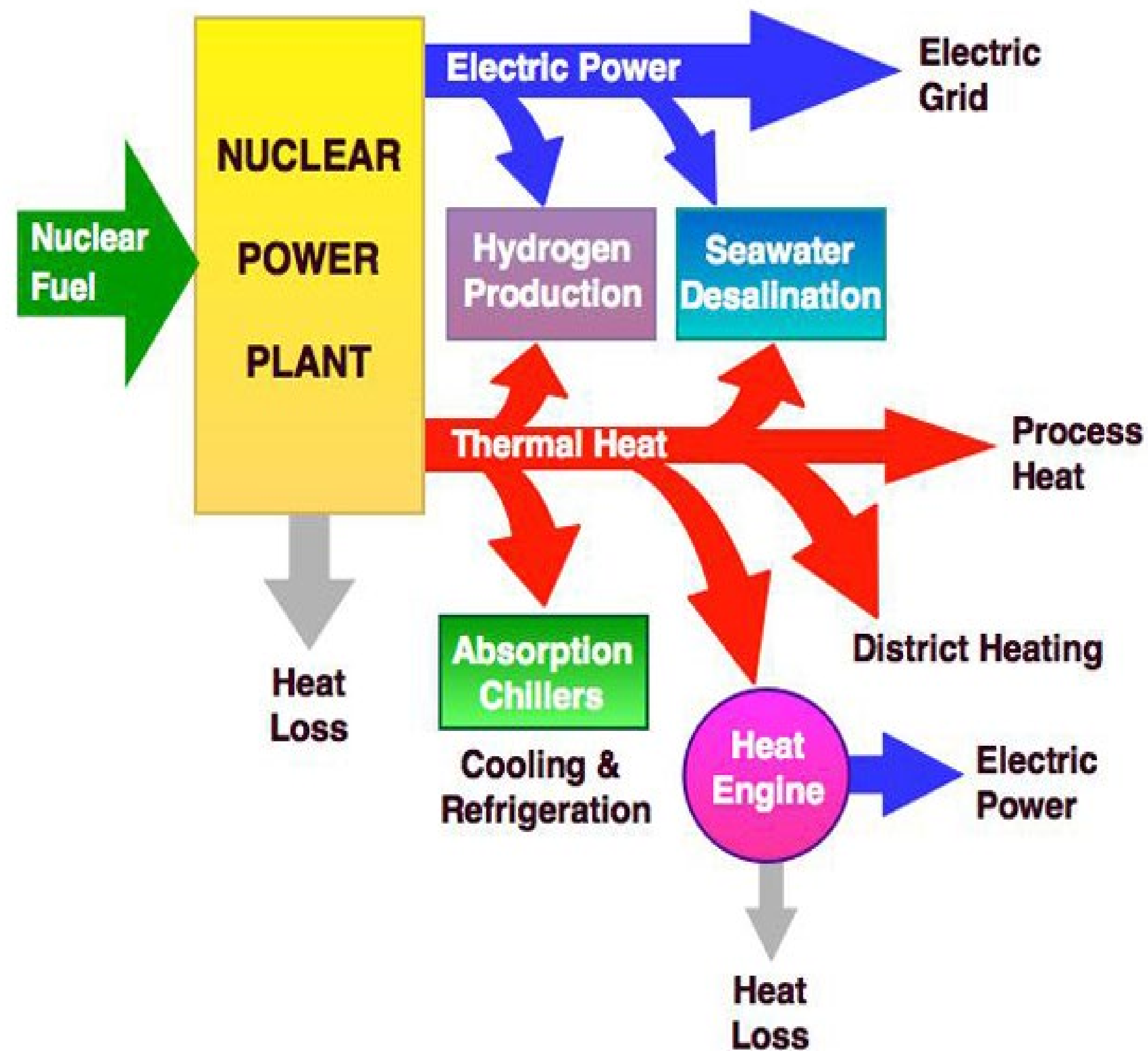
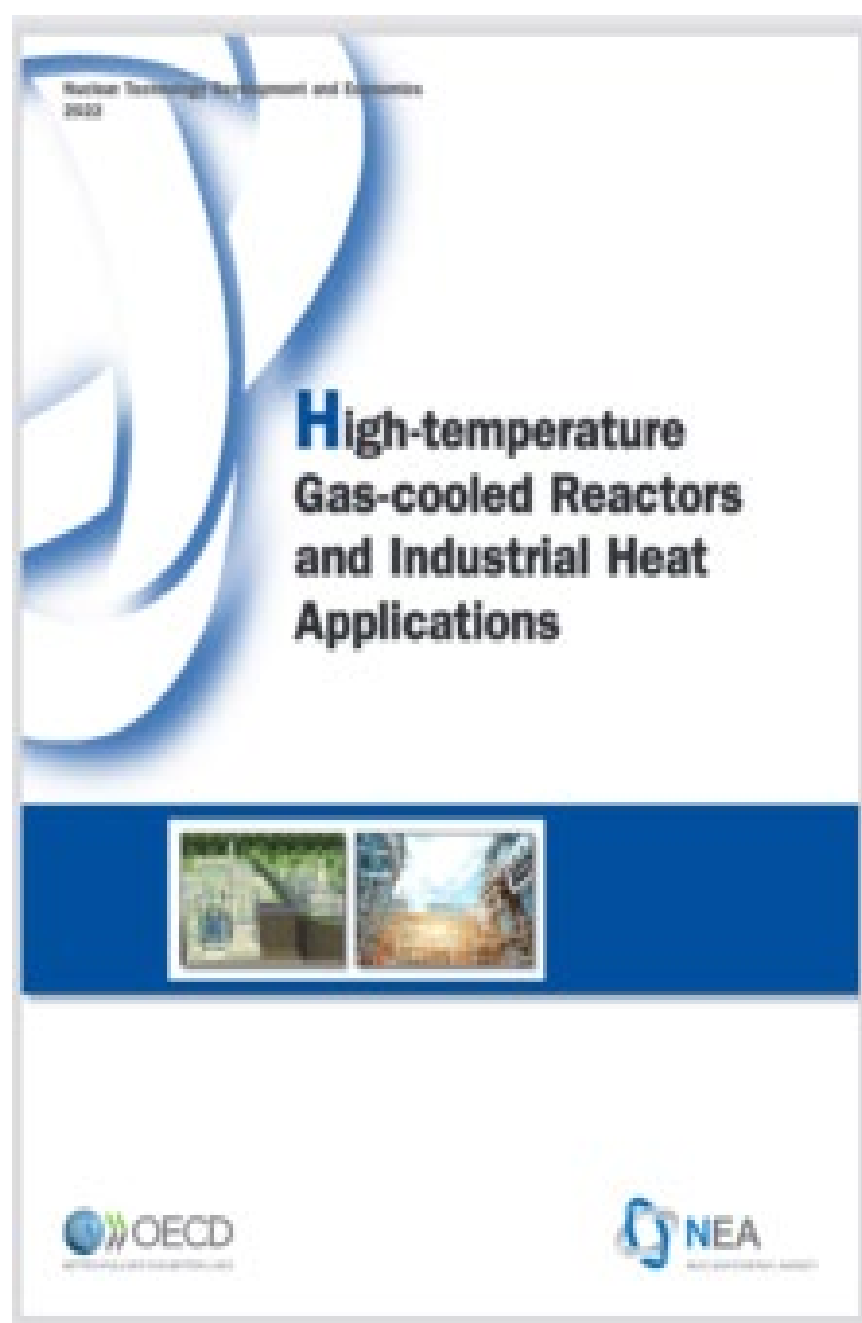


Press centre Employment Contact

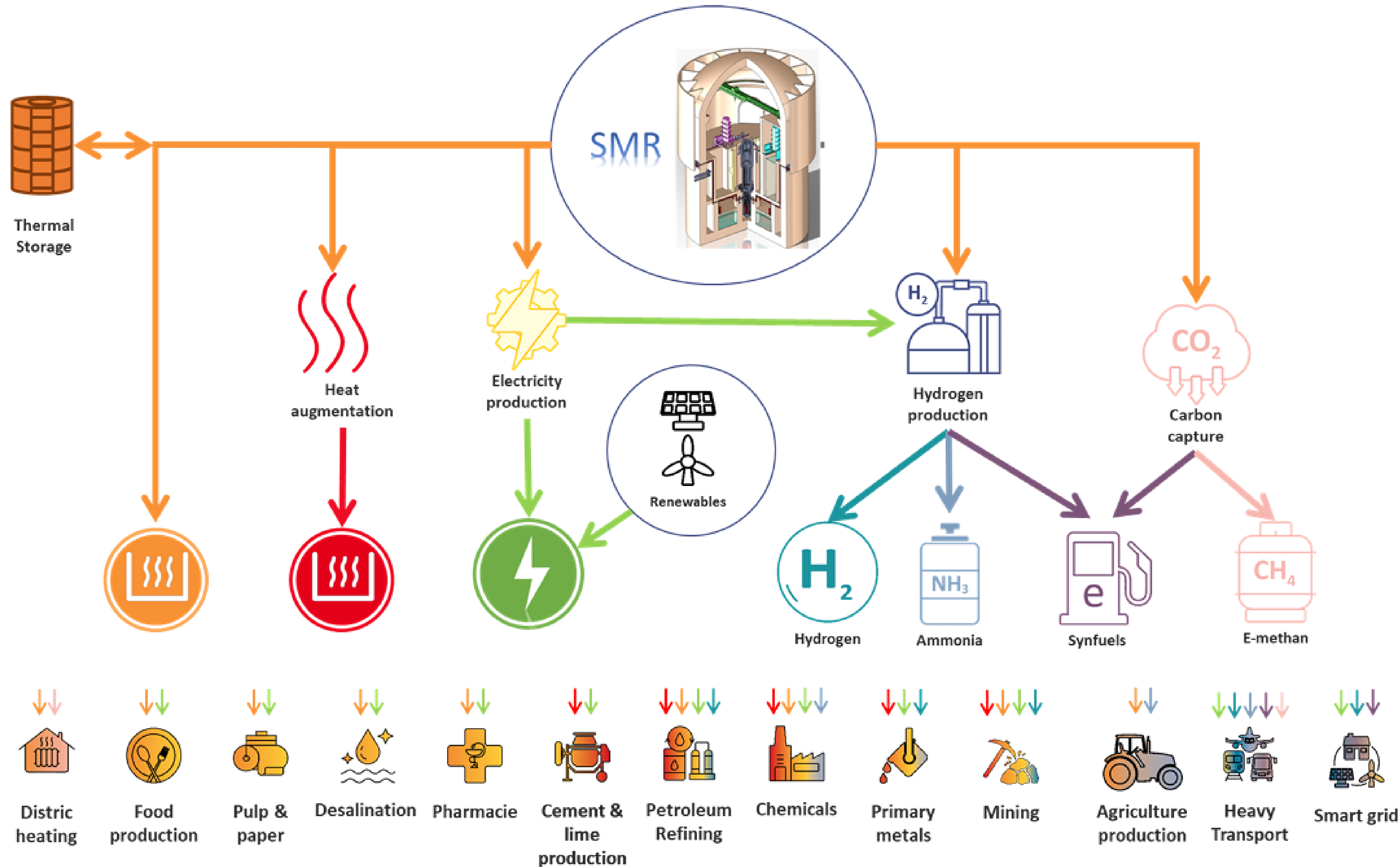
TOPICS SERVICES RESOURCES NEWS & EVENTS ABOUT US

Search

Home / Topics / Nuclear technology and applications / Energy / Non-electric applications



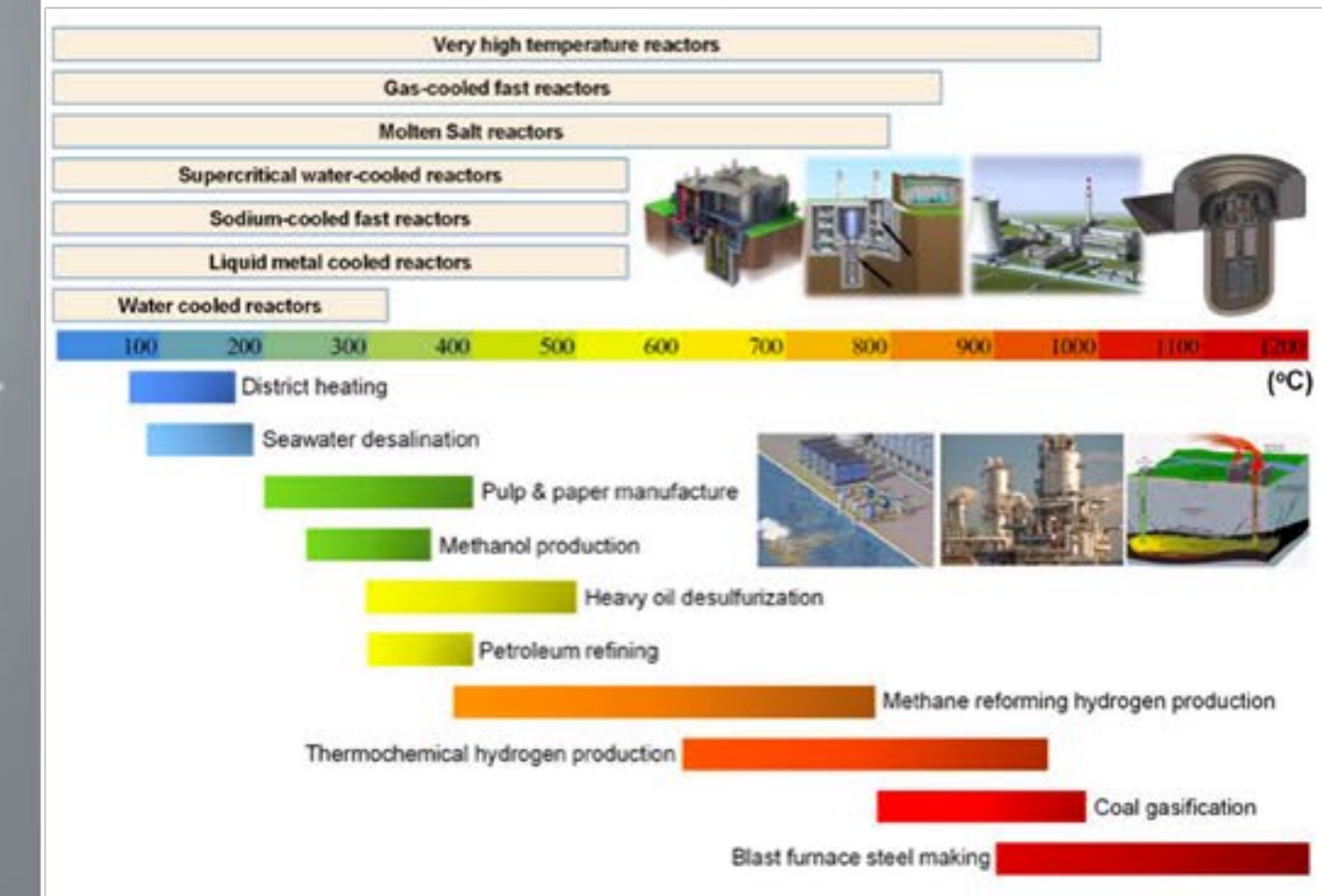
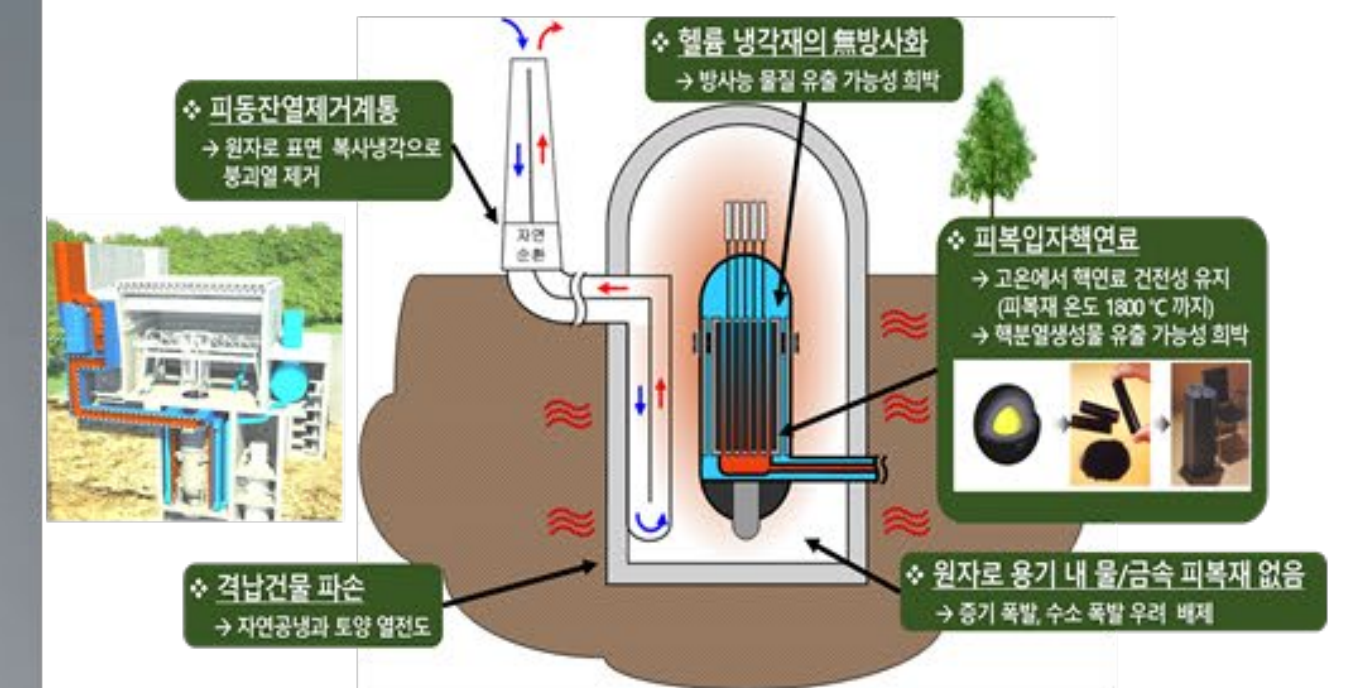
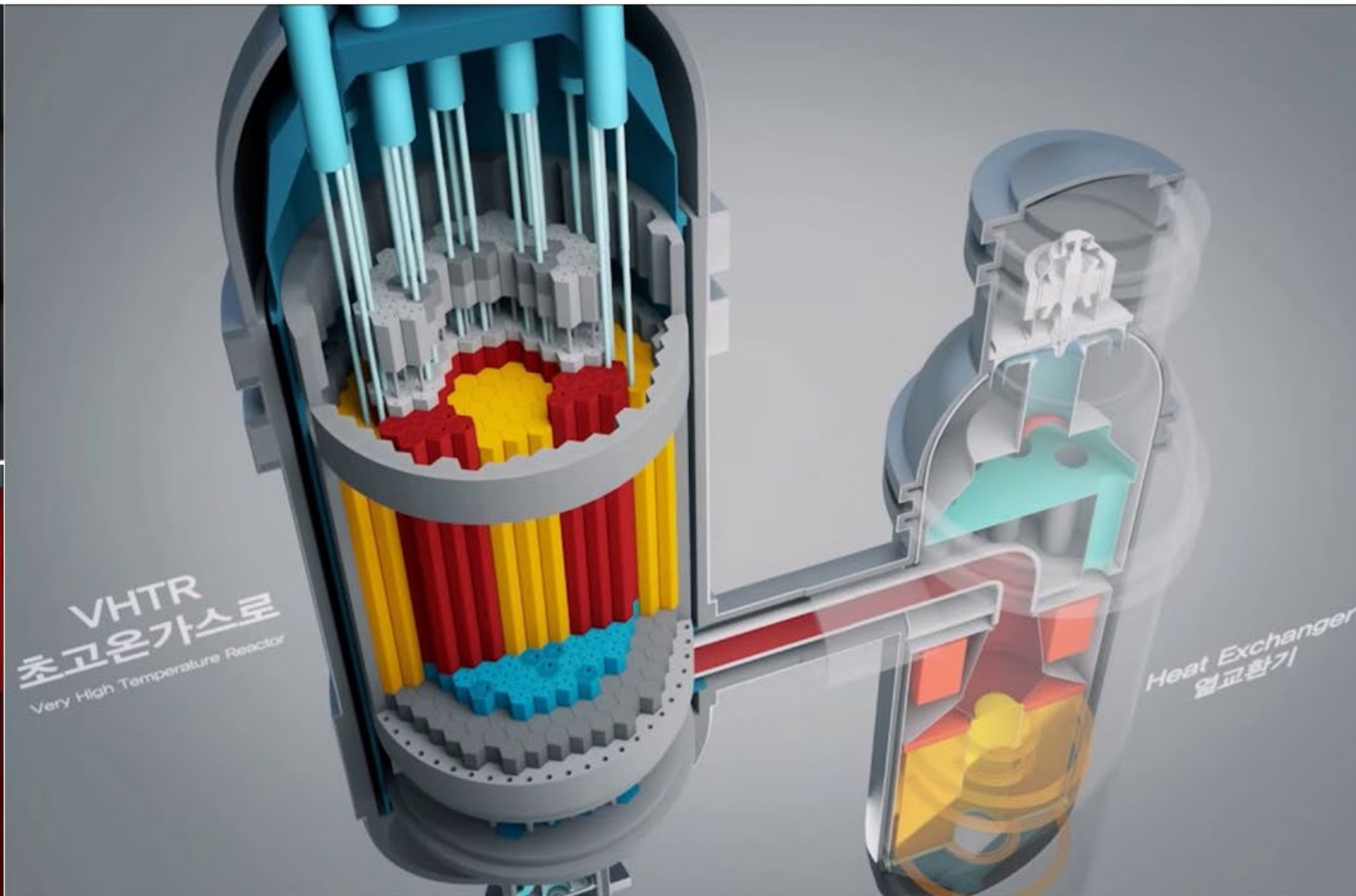
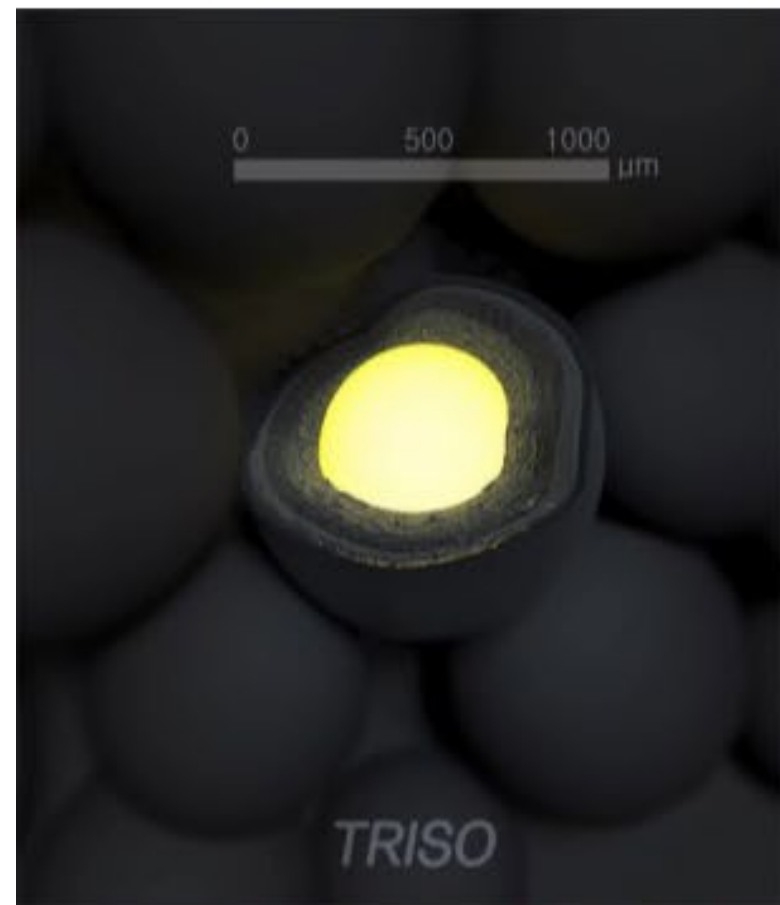
04. SMR 비발전활용



Source: Ph. Amphoux et al, « IDNES, a CEA project dedicated to SMR concepts for decarbonization beyond pure power generation, Proc. Int Conf. IAEA on SMR and their applications, Vienna, Austria, October 2024.

05. 무탄소 열원의 해법: 고온가스로

- ❑ 피복입자핵연료, 흑연감속재, 헬륨냉각재, 고온의 열에너지 생산
- ❑ 고유안전성(수요지 근처 건설), 고온열생산(다목적 활용), 핵비확산성(용이성)



06. 원자력 열활용 경제성은?

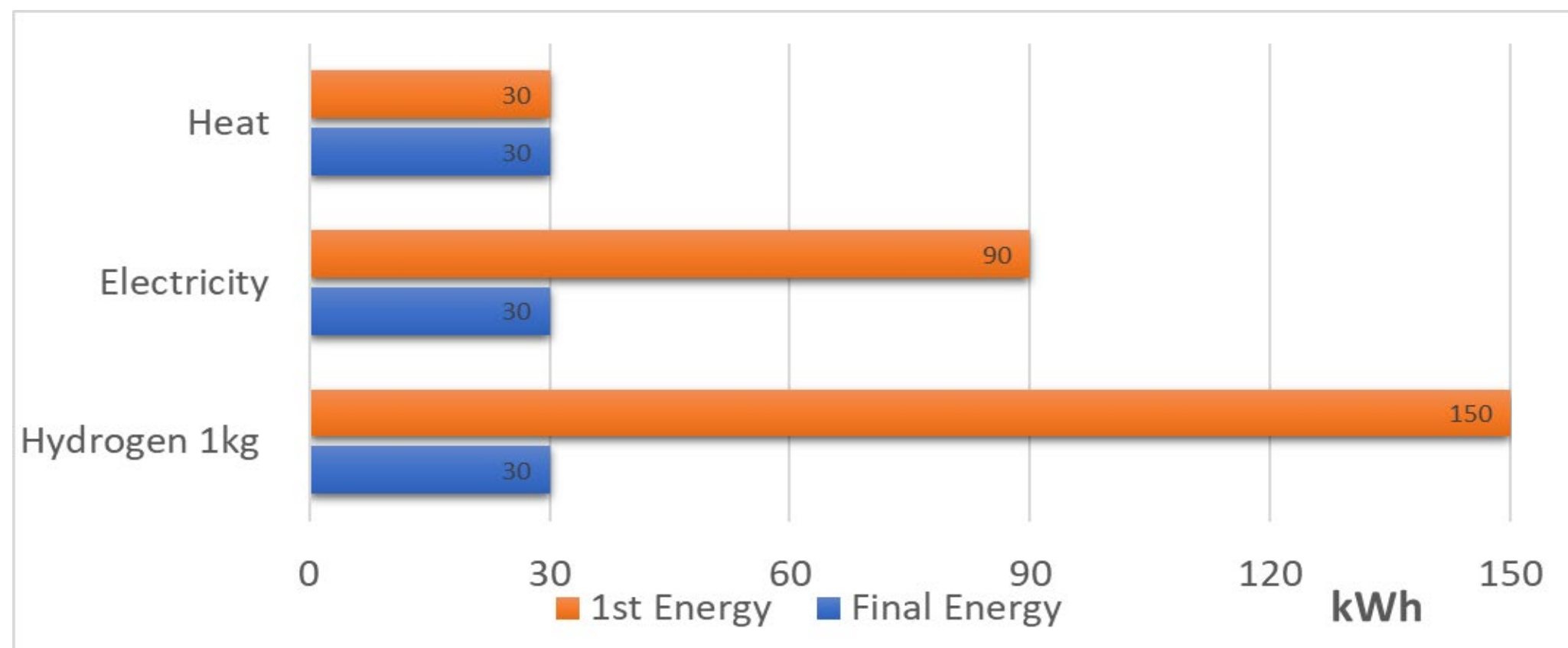
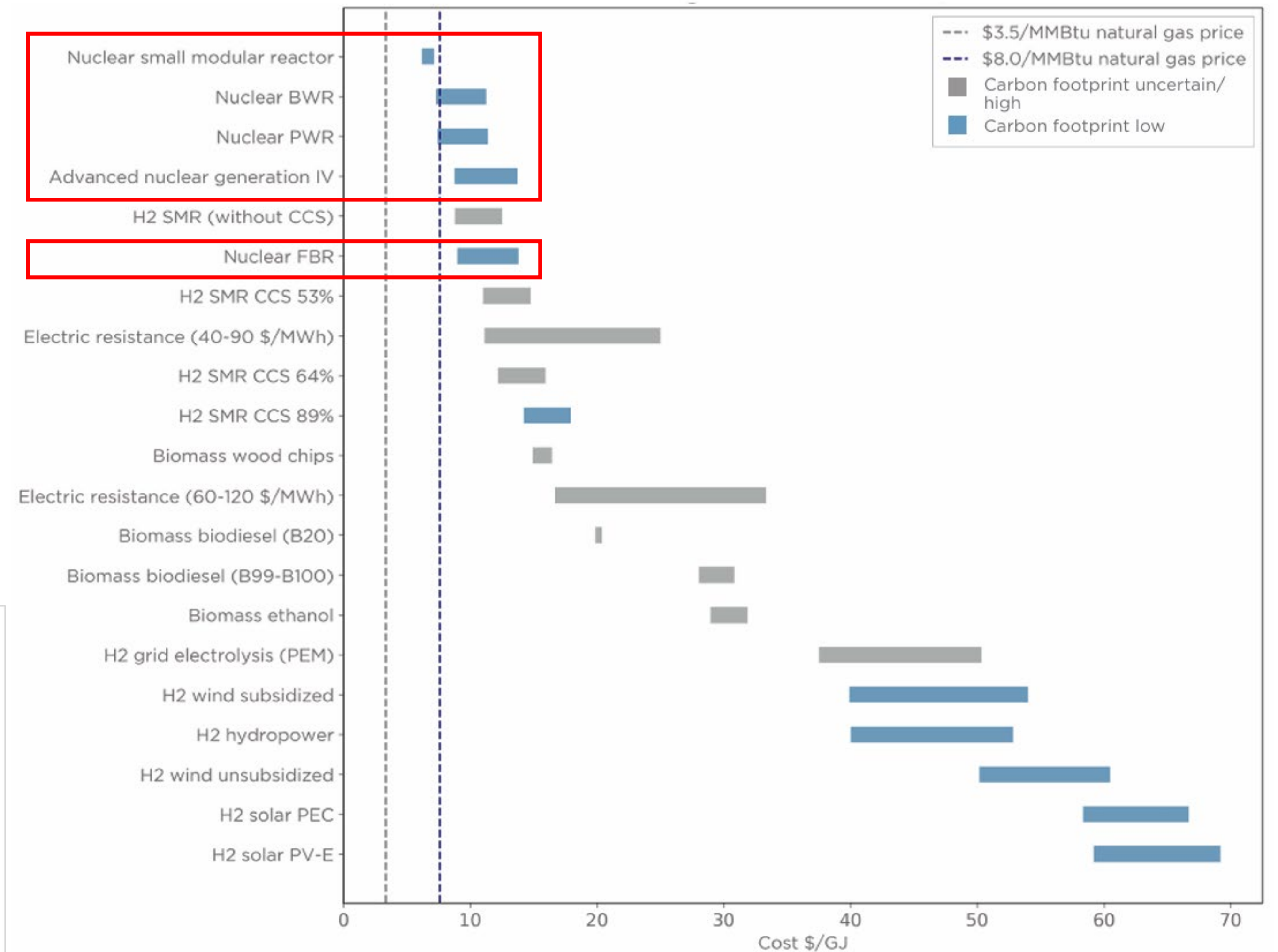


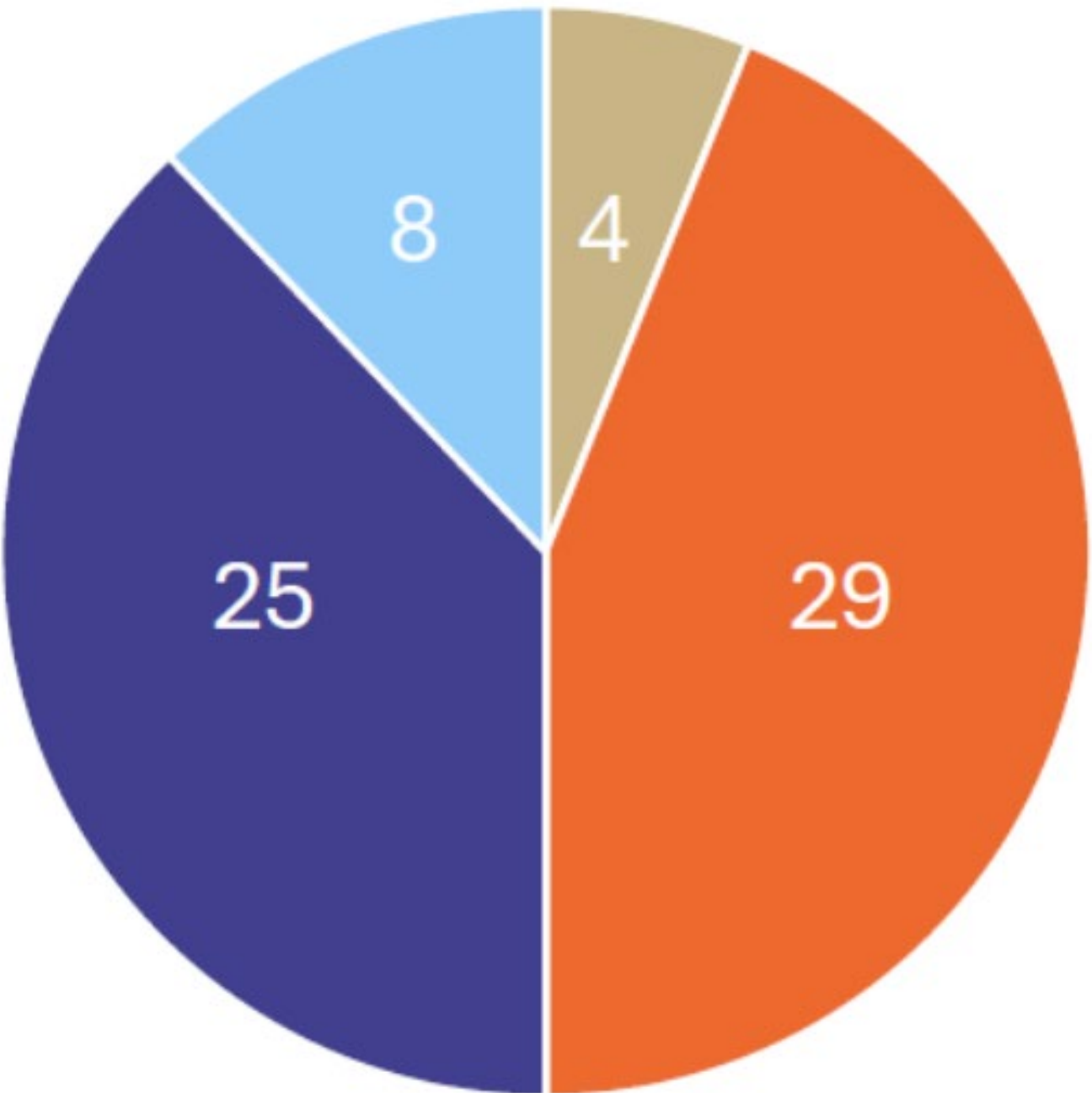
Figure 5: Generic cost comparison summary for various options of heat



07. 원자력 배발전활용 현황 및 공정열 활용 사례








74개 원자로가 750 Rx-Year 원자력비발전활용 (0.5% 활용)

Non-Electric Applications by Type



- Process Heating Only
- District Heating Only
- District Heating and Process Heating
- Desalination

*Numbers are per reactor
 *Data from IAEA Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No. 2, 2023 edition

	Reactor Type	Application	Location	Capacity	Operation
 Canada	Bruce A CANDU reactors (PHWR)	Heavy Water Production Bruce Energy Centre(BEC)	On-site Heavy Water Production Off-site Supply to BEC	5,350 MWth	'81~'97
 Germany	Stade PWR	Salt Refinery	Off-site (1.5 km)	30 MWth	'84~'03
 Switzerland	Gösgen PWR	Cardboard Factory	Off-site (1.75 km)	45 MWth	'79~Present
 Norway	Halden BWR	Paper Mill	Adjacent Site	20 MWth	'79~'18
 UK	Calder Hall MAGNOX	Fuel Plant	Adjacent Site		'56~'03
 India	Rajasthan NPP (PHWR)	Heavy Water Production		693 MWth	'80~
 China	Tianwan NPP (VVER-1000, ACPR1000)	Desalination Steam for Petro-chemical Plant	Off-Site (10~30 km)	6,000 MWth	'24~

08. 지역난방 사례

energynews.pro

Finland to build its first SMR for district heating in 2025

Please share: Finland is set to revolutionize its energy sector with the installation of its first small modular reactor (SMR) dedicated to district heating.

2024. 6. 10.

POWER Magazine

Is a Nuclear Reactor Headed to the Heart of Your City?

A new initiative known as Nuclear in District Energy Applications (NuIDEA), developed by EPRI and a group of more than 20 other organizations, could result in...

2023. 3. 2.

World Nuclear News

SMR partnership targets Swedish district heating

Swedish small modular reactor project development company Kärnfull Next has formed a strategic partnership with Finnish SMR developer Steady...

2024. 6. 18.

World Nuclear News

Axpo considers extended operation of Beznau plant

Swiss utility Axpo said it is assessing the technical feasibility of operating the two-unit Beznau nuclear power plant beyond the 60 years currently planned.

2024. 4. 3.

World Nuclear News

HTR-PM heating project commissioned

The nuclear heating project of the demonstration High Temperature Gas-Cooled Reactor-Pebble-bed Module at the Shidaowan site in China's Shandong province has...

2024. 4. 2.



China's first commercial nuclear district heating scheme expands

China's Haiyang nuclear power plant in Shandong province has begun its sixth heating season, covering an area of nearly 13 million square metres - 500,000 square metres more than last year.

Energy & Environment • Thursday, 21 November 2024

중국 Shandong Haiyang 900MWth 지역난방 사업

AP1000 2기 운영중

1단계 사업

- 700,000m² 지역난방 플랜트 건설('19.4~'11)
- 2019년 11월에 상업운전 시작

2단계 사업

- 4,500,000m² 지역난방 플랜트 건설('21년)
- 202MW, 346t/h 증기 활용

최종사업

- 120km 떨어진 Tsingtao시에 지역난방 사업
- 건설기간('22.7~'23.11)

효과

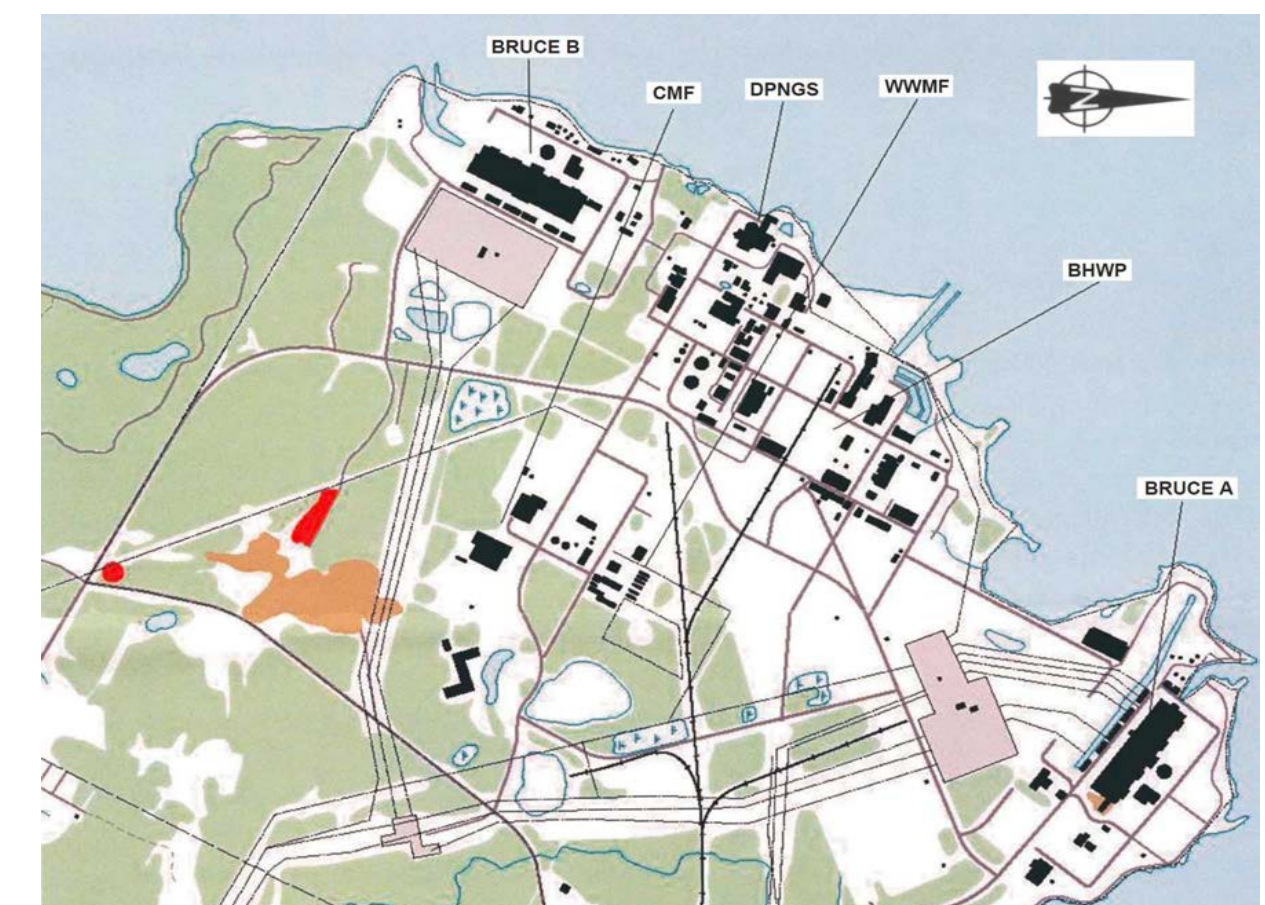
- 열효율 55.9%로 상승
- 중국 석탄화력의 70% 가격으로 지역난방 공급

09. 캐나다 Bruce A 원자력발전소 비발전활용 (~1997)

- 캐나다 내 가장 큰 원전부지
 - 4기의 848 MWe Bruce A 원자력발전소에서 중압 증기 생산
- 증기수요처
 - On-site: 2기의 중수 생산 플랜트
 - Off-site: Bruce 에너지 중심 산업파크
 - 플라스틱 및 알코올 생산, 온실, 난방
 - 계단 식 열공급: 증기→응축수
- 특이사항
 - 원자력 부지 내 공정 플랜트 건설
 - 상당량의 황화수소 포집 (가연성, 독성, 부식성)
 - 3차계통으로 공정열 공급 (특별한 인허가 현안 없었음)
 - 백업 증기 계통 (3개의 석유보일러)
 - 응축펌프용 비상 전원
 - 3개의 사업주체
 - 원자로 운영자, 중수 플랜트 운영자, 산업센터



Bruce Heavy Water Plant



10. 중국의 원자력 증기 공급 사업(석유화학공단)



CNNC 텐완 원전 공업 증기 공급 사업

- 텐완원전 증기 공급(480만톤)
- 활용처: 렌원강 석유화학단지
- 연간 107만톤 이산화탄소 감축
- 연간 184톤 이산화황 감축
- 연간 263톤 질소산화물 감축
- 세계 최초/최대 규모 원자력공정열 상업화 실증
- 기존 인프라 활용



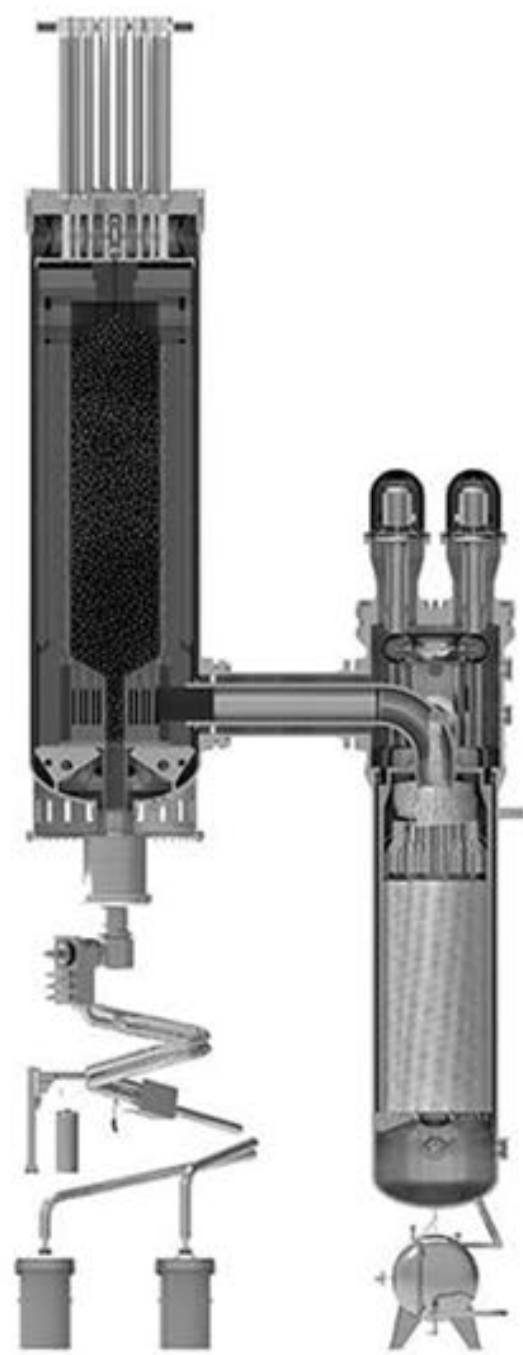
CNNC 쉬웨이 HTR-PM600S 사업

- 고온가스로형 HTR-PM 6기 (초고온 증기 생산)
- 대형경수로 1.2GWe급 2기 (전력 생산)
- 장수성시 석유화학산단 증기 및 전력 공급
- 2025년 초 사업 착수
- '21년 전력망 전력공급을 시작한 HTR-PM의 후속사업
- 중국 내 고온가스로 공정열 산업활용 도모

4개 추가 사업 진행(Tianwan, Sanmen, Fuqing, Hainan), 4개 사업 타당성검토(Qinshan, Zhangzhou, Haiyang, CGN)

11. 미국 Dow Chemical 의 Xe-100 ARDP (Long Mott Energy)

- 미국의 선진원자로 실증프로그램(ARDP)
 - 2030년 내 제4세대 원자로 실증 (TerraPower의 Natrium, X-energy의 Xe-100)
- Dow Chemical社 텍사스주 Seadrift 부지 증기 및 전력 공급
 - 2025년 4월 NRC에 건설허가 신청



Dow, X-energy SMR deployment project progresses

New Nuclear - Wednesday, 1 March 2023



Dow's Seadrift site selected for X-energy SMR project

New Nuclear - Thursday, 11 May 2023



X-energy awarded federal tax credit for TRISO fuel plant

Uranium & Fuel - Wednesday, 24 April 2024



Application lodged for construction of Texas SMR plant

Industrial giant Dow and X-Energy Reactor Company have submitted a construction licence application to the US Nuclear Regulatory Commission for the proposed advanced nuclear project at Dow's Seadrift site in Texas.

New Nuclear - Monday, 31 March 2025



Multiple Xe-100 SMRs planned for Washington State

New Nuclear - Wednesday, 19 July 2023



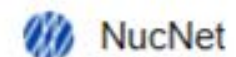
Amazon invests in X-energy, unveils SMR project plans

New Nuclear - Wednesday, 16 October 2024



12. 미국 BWXT, 프랑스 Jimmy

미국 BWXT의 50 MWth BANR 초소형 HTGR



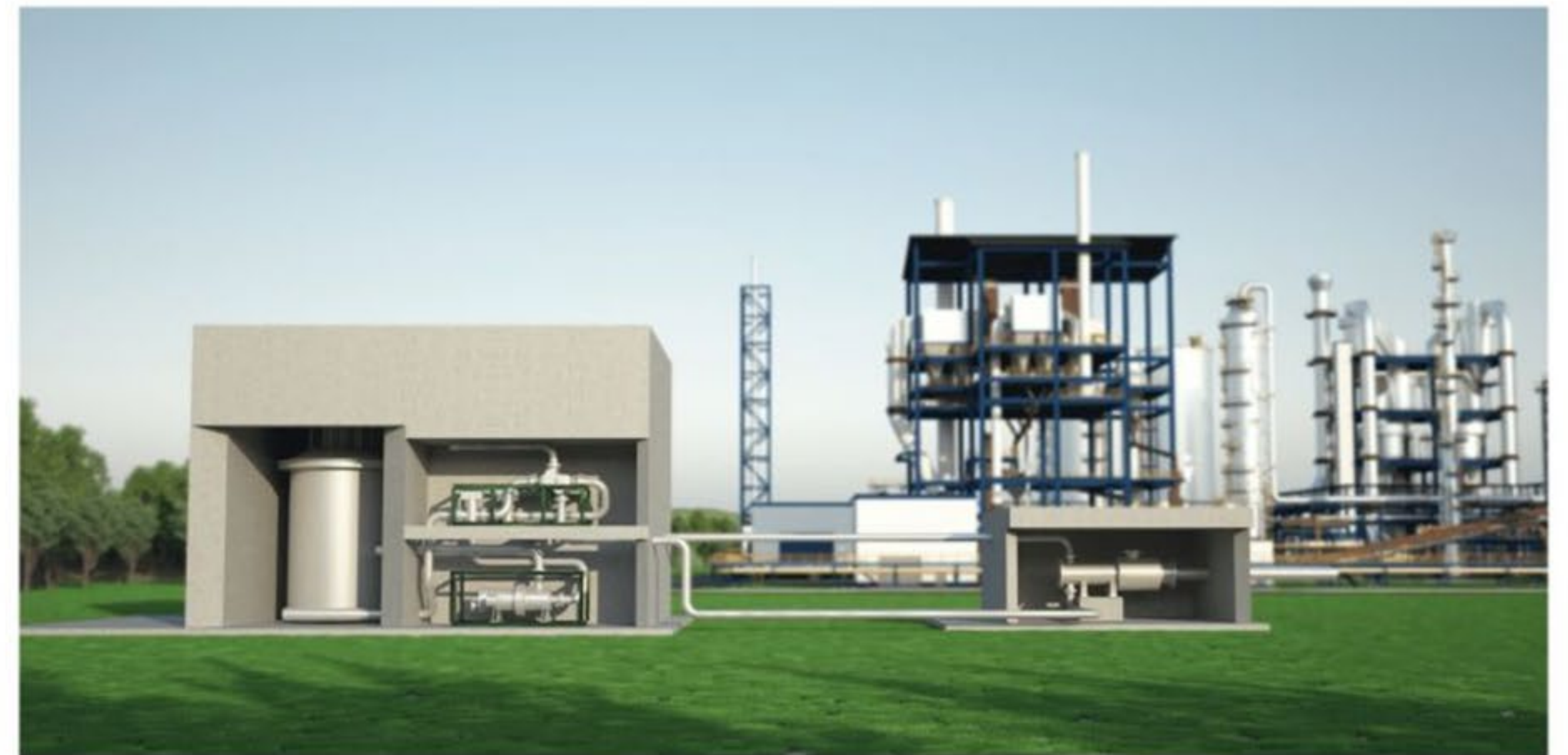
US / Tata Considering Microreactors At Soda Ash Subsidiary's Wyoming Mining Site

Tata Chemicals North America's soda ash subsidiary signed a letter of intent with BWXT Advanced Technologies to explore the deployment of up to eight...

2024. 12. 19.



프랑스 Jimmy의 20MWth 초소형 HTGR



Le Monde.fr

France's first small nuclear reactor project

Start-up company Jimmy Energy is exploring a small reactor model, designed to supply heat to a factory belonging to the Cristal Union sugar...

2024. 6. 26.



13. 영국의 선진원자로 개발 및 실증

NIRO, Advanced Modular Reactor Technical Assessment, 2001

<https://www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactors-amrs-technical-assessment>

Table 3: Assessment of AMR Technologies with Respect to High-Level Criteria

	HTGR	SFR	LFR	MSR	SCWR	GFR
Timescales for delivery	Very High	Very High	Medium	Medium	Low	Low
Heat	Very High	Medium	Medium	High	Medium	High
Safety	Very High	Medium	Medium	Medium	Low	Low
Security	Very High	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
UK Value	High	High	Medium	Low	Low	Low
Economic Cost	High	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
Deployability	High	High	High	High	Medium	High
Adaptability	High	High	High	Very High	Medium	High
Waste & Environment	Medium	High	High	High	High	Very High
International	Very High	High	Medium	Medium	Low	Low

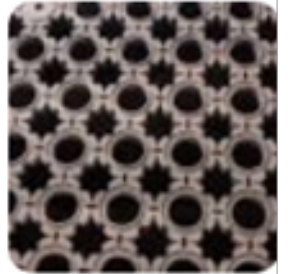
World Nuclear News

UK seeks views on HTGR advanced reactor demonstration plan

Feedback is being sought on the proposed plan ahead of a formal Invitation to Tender for the Advanced Modular Reactor Research, Development & Demonstration...

2022. 2. 17.

The AMR RD&D programme, part of the £385 million Advanced Nuclear Fund, focuses on developing high temperature gas reactors (HTGRs), with an ambition for a demonstrator by the early 2030s, as they optimise opportunities for decarbonising industrial heat to support the UK's target of reaching net zero by 2050.



World Nuclear News

Japan, UK enhance cooperation on HTGRs

Japan, UK enhance cooperation on HTGRs ... The UK's National Nuclear Laboratory and the Japan Atomic Energy Agency have signed a memorandum of...

2023. 9. 8.



World Nuclear News

UK's NNL and Japan's JAEA strengthen HTGR fuel collaboration

UK's NNL and Japan's JAEA strengthen HTGR fuel collaboration ... The UK's National Nuclear Laboratory and the Japan Atomic Energy Agency have...

2024. 4. 24.



World Nuclear News

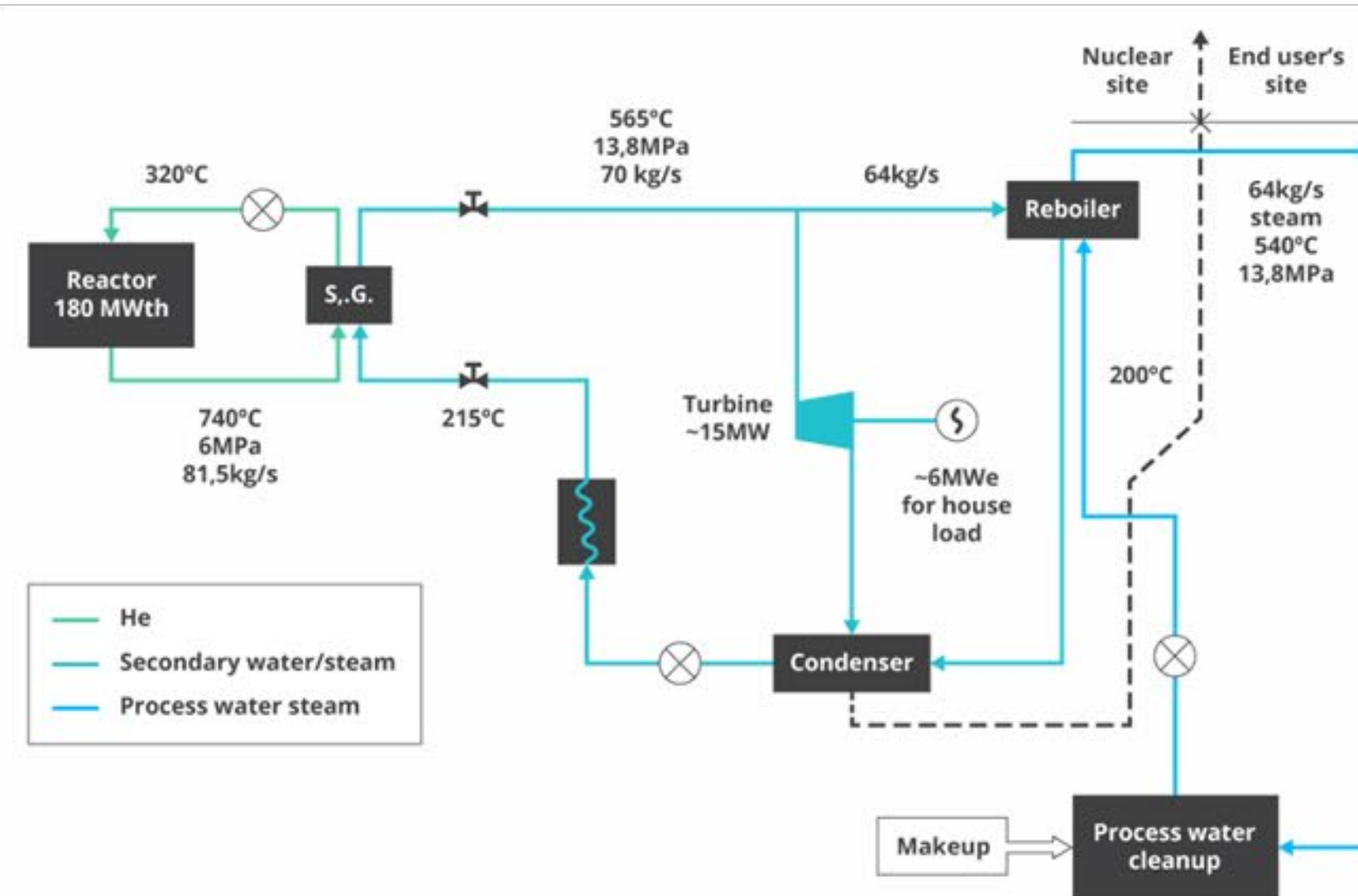
Jacobs to assist in development of UK-Japanese HTGR

Jacobs to assist in development of UK-Japanese HTGR ... The UK's National Nuclear Laboratory has appointed engineering group Jacobs to help in the...

2024. 5. 28.

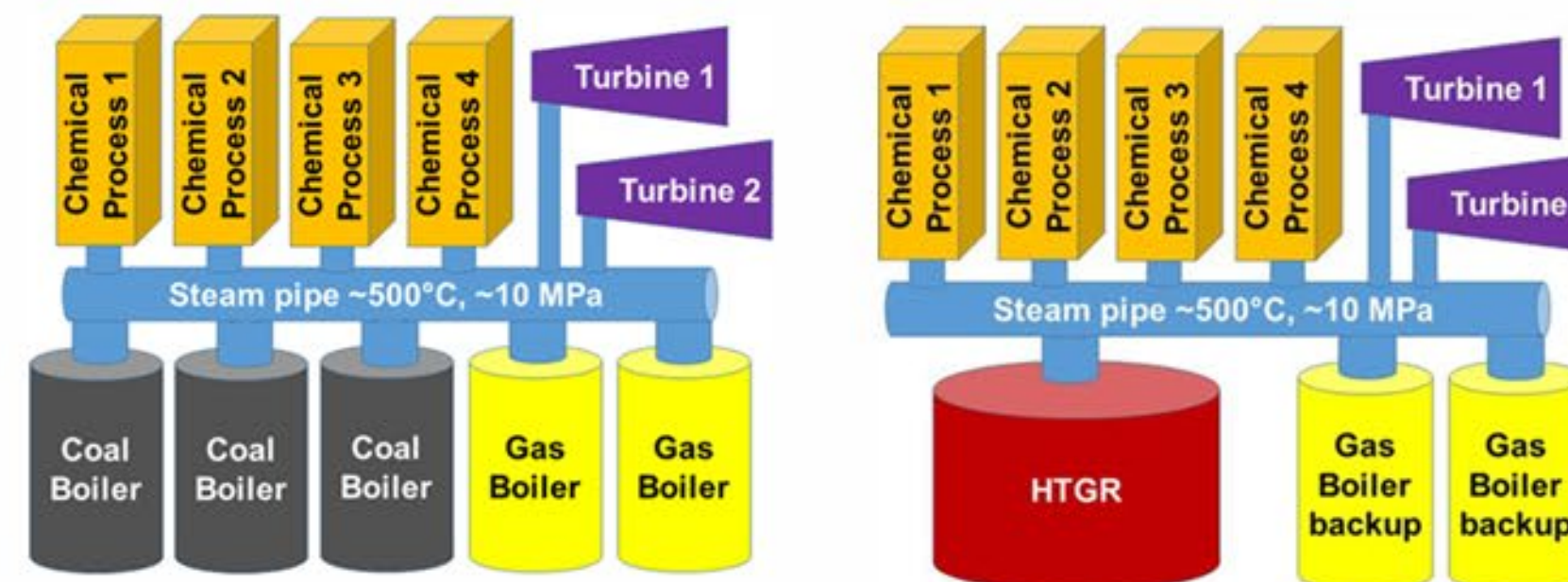


14. EU의 GEMINI 4.0, 폴란드 HTGR-POLA

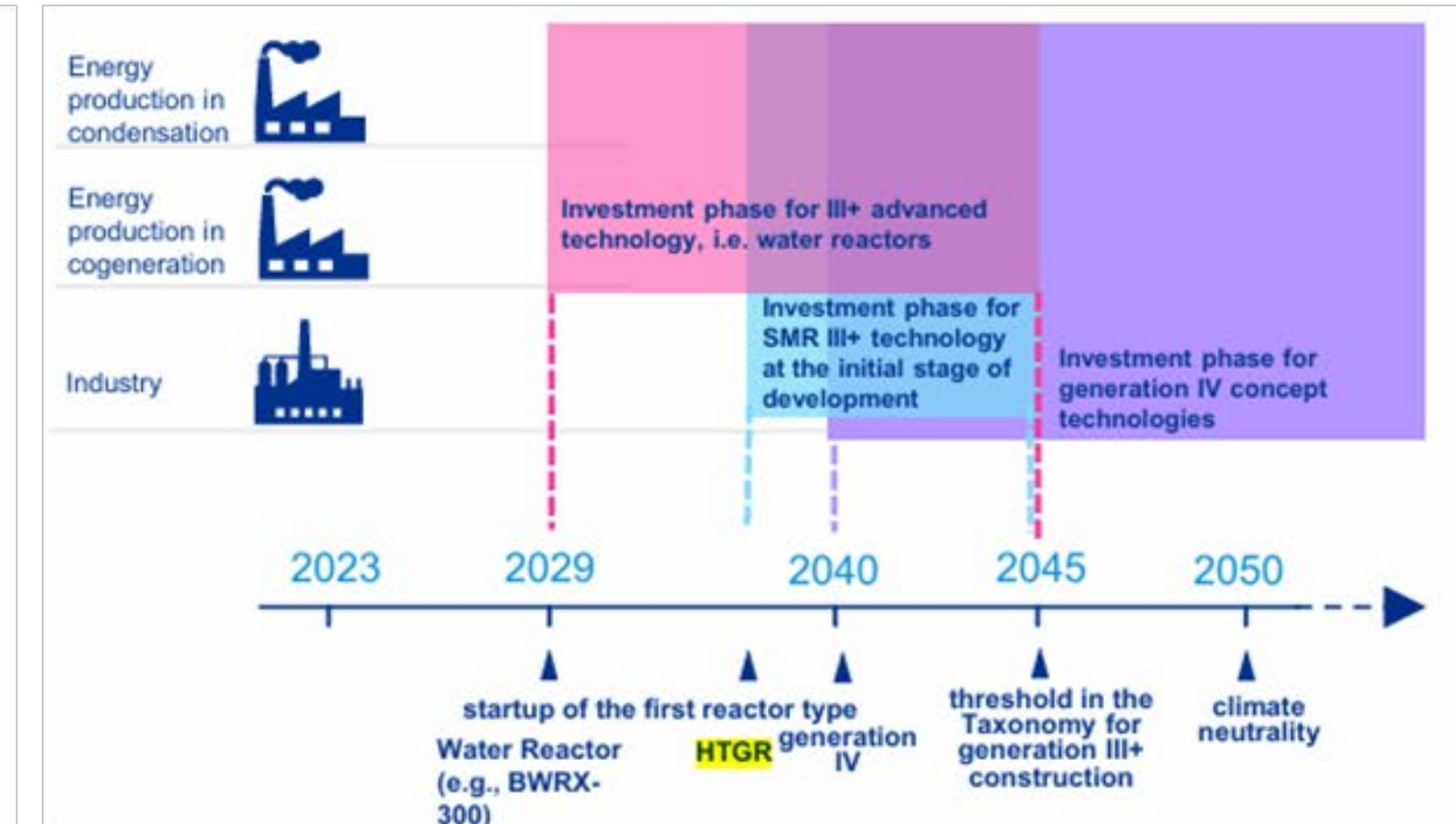


Primary target for HTGR is Polish heat market. Today 100% heat market is dominated by fossil fuels; mostly coal in district heating and coal and gas in industry heat generation. 13 largest chemical plants need 6500 MW of heat at T=400-550°C.

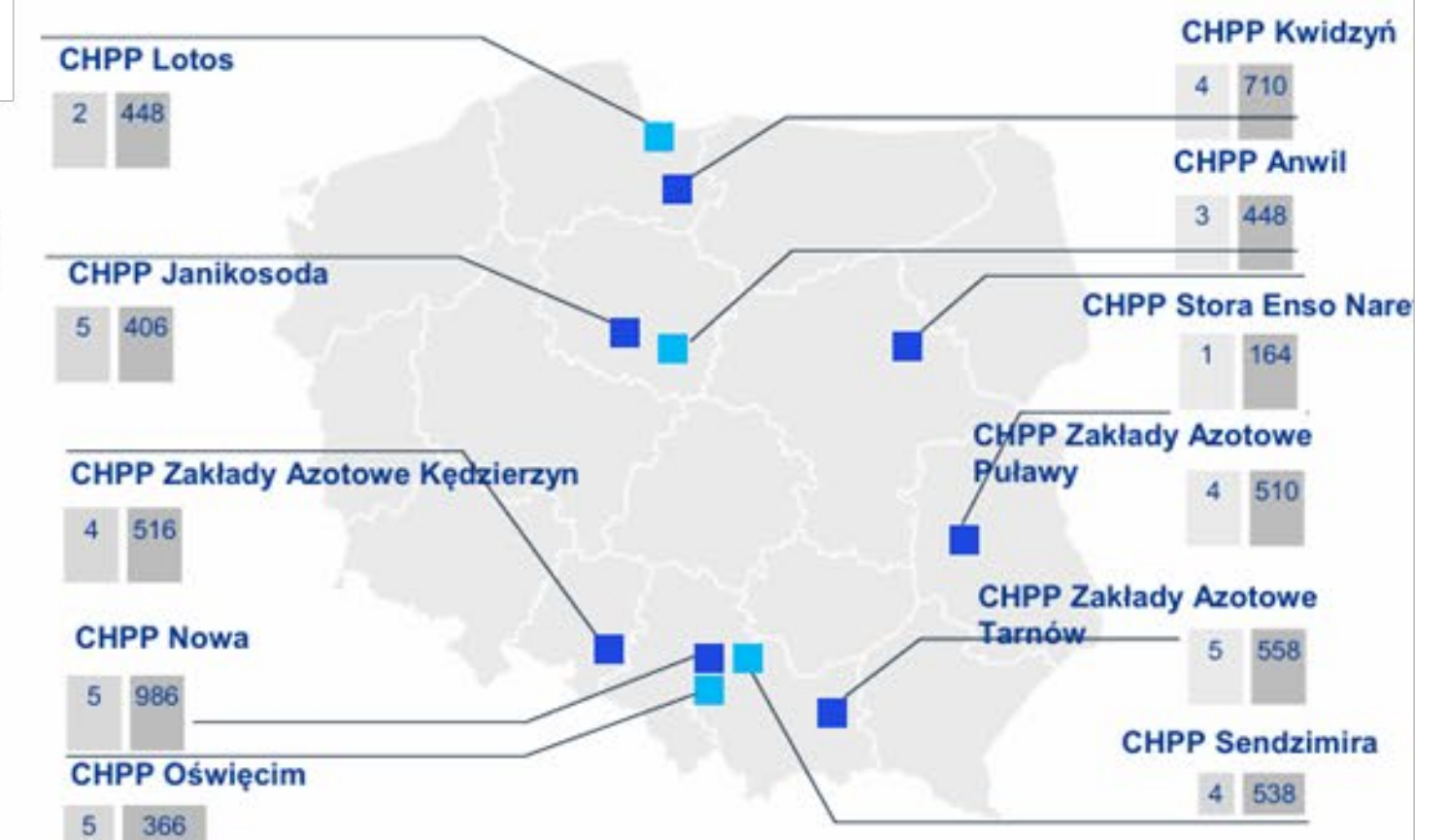
Secondary target is the hydrogen production.



Source: KPMG



Map: Poland's largest industrial combined heat and power plants



Legend: Name of the CHPP

coal-fired sources
 gas-fired sources
 number of turbine generator units
 Achievable thermal power [MWt]

1. Report of the Team for Analysis and Preparation of Conditions for Implementation of High-Temperature Nuclear Reactors, Department of Nuclear Energy of the Ministry of Energy, 2017

HitVaTech

CVR Research Centre

EDF

framatome

Hit Tech Relay

iehti

JAEA

European Commission

KAERI

LGI sustainable innovation

NATIONAL CENTRE FOR NUCLEAR RESEARCH SWIERK

NRG Nuclear. For life.

synthos green energy

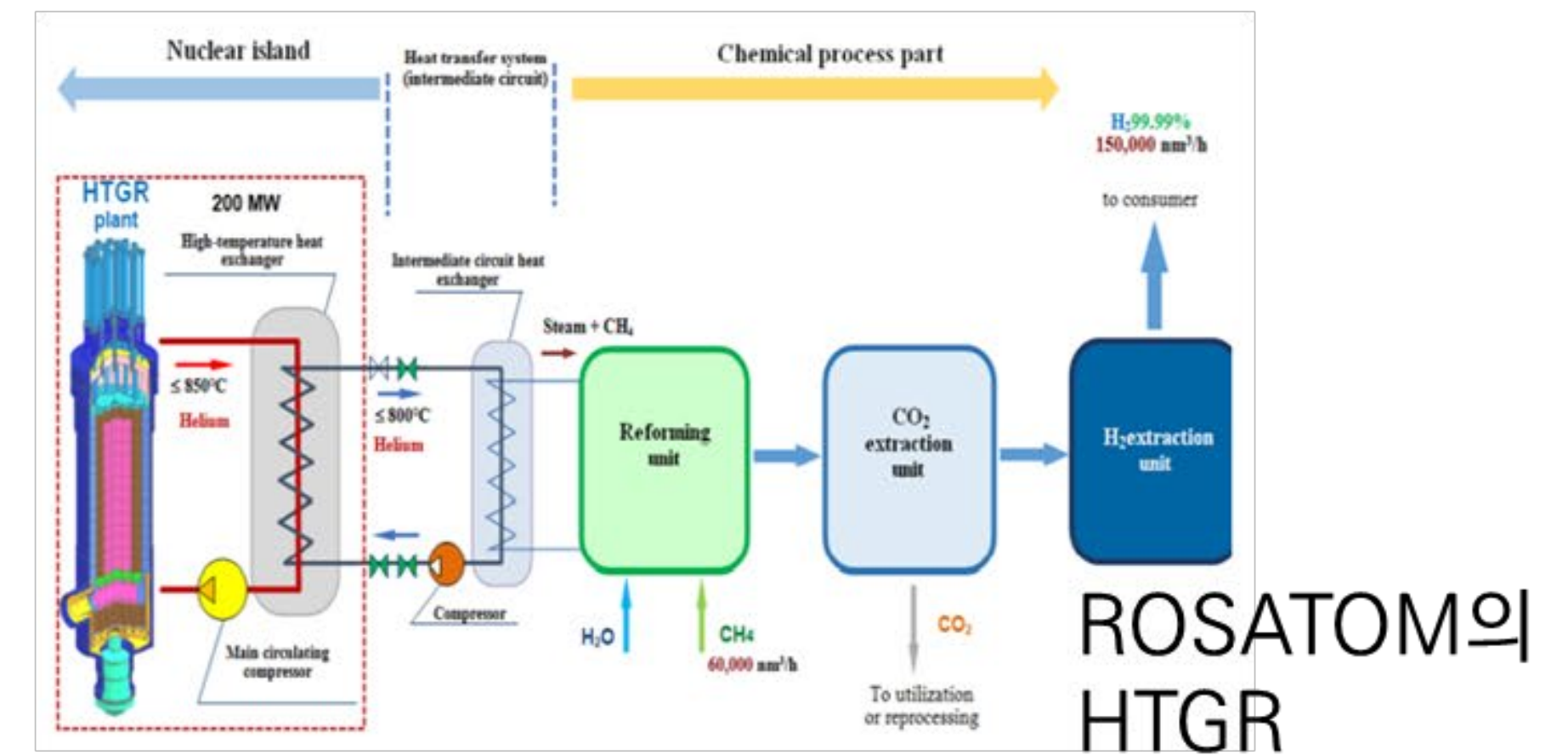
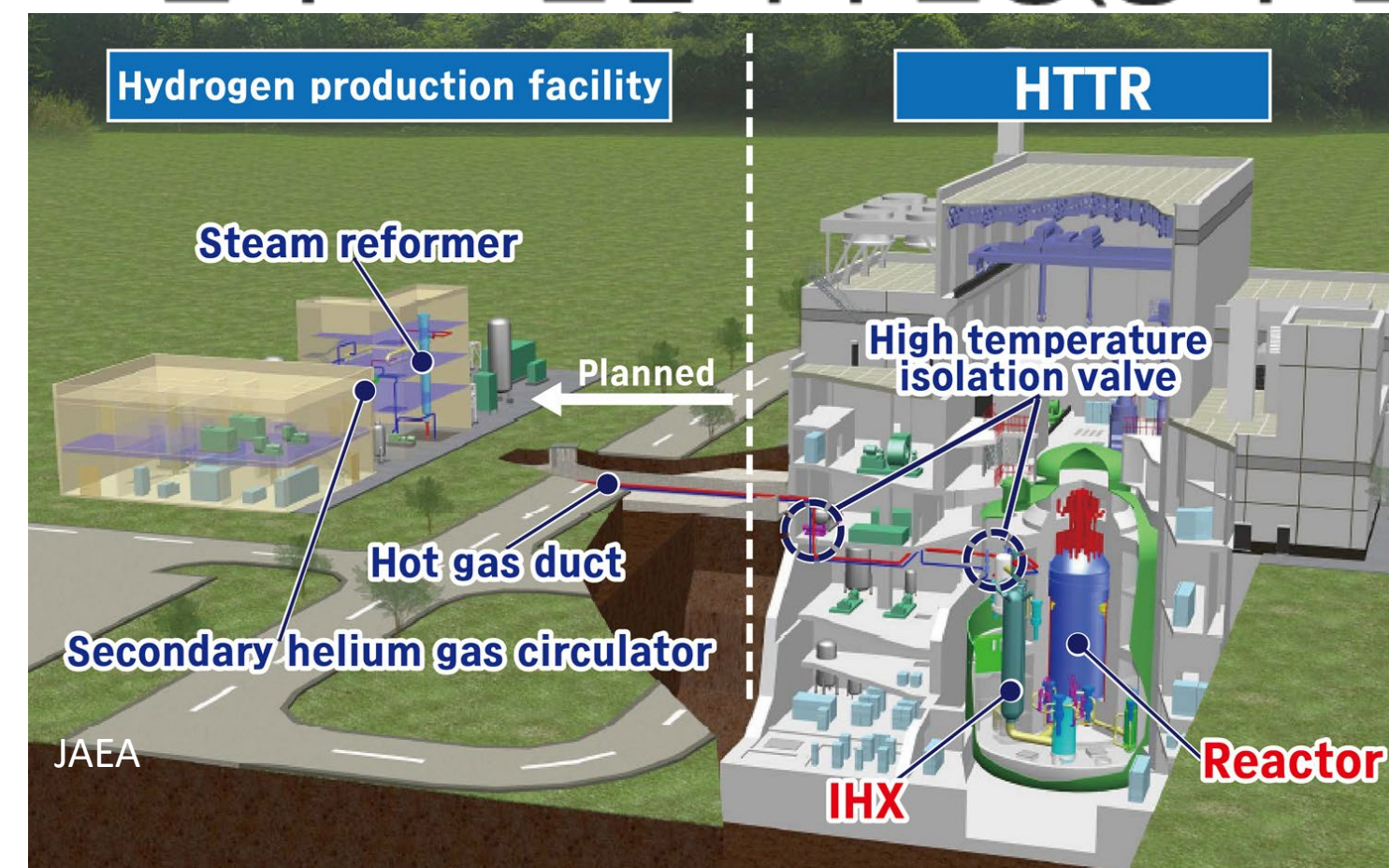
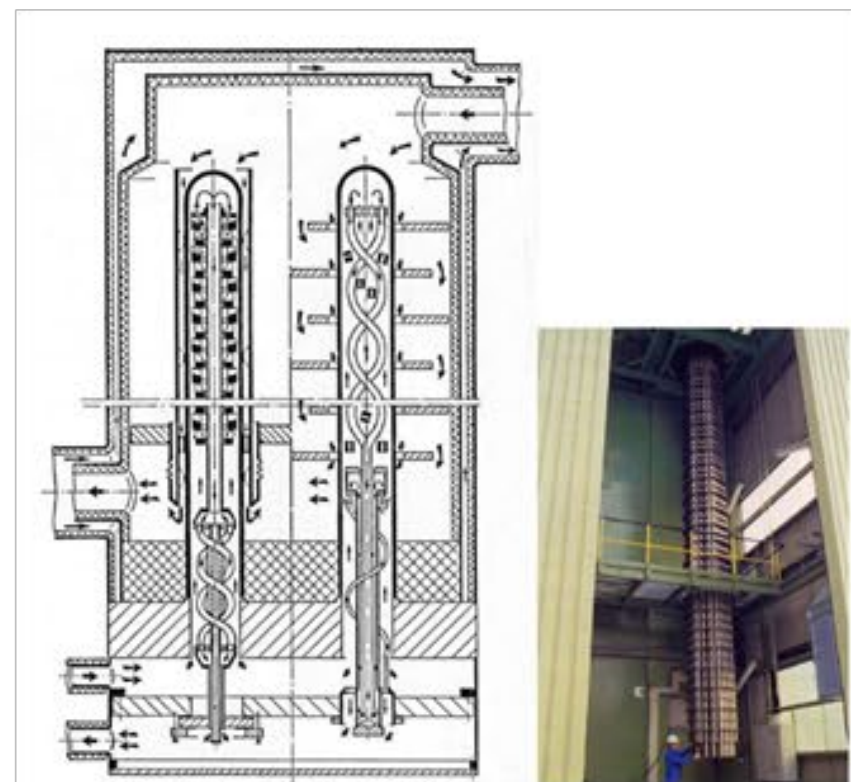
TRACTEBEL ENGIE

ULTRA SAFE NUCLEAR

VTT

15. 고온가스로 활용 헬륨가열 천연가스 증기 개질

- 독일 FZK ('70s~'80s)
 - 70년대 석탄가스화 및 액화를 위한 고온가스로 활용 천연가스 증기개질 실증 연구
 - 실증로 및 첫번째 상업로 건설 성공, EVA-I, II 시험을 통해 헬륨 가열 천연가스-증기개질 반응기 실증 (5MWth→10MWth, 단일관 → 30개 튜브 번들)
- 일본 JAEA
 - '00년대 중반 헬륨루프 활용 수백kW급 규모 헬륨 가열 증기개질 공정 실증
 - '28년까지 고온가스로형 시험로 HTTR 연계 천연가스 증기개질 공정 실증 (원자로와 70m거리, MW급)
- 러시아 ROSATOM
 - '28년까지 200MWth 고온가스로 건설허가 신청(증기-산소 메탄 개질 공정, 150,000 Nm³H₂/hr)



16. 국내 가동원전 활용 비발전 사업 현황

朝鮮日報

"방사성 물질 나온다" 원전 괴담에... 해수담수화 시설, 2000억 고철 됐다

고리원전서 11km 기장군 담수시설
7년간 수백 번 검사해도 안전하는데
환경단체는 "방사성 물질 나온다"



26일 부산 기장군 해수 담수화 시설이 부식된 상태로 방치돼 있다. 2000억원을 들여 만들었지만 이곳에서 생산한 담수에서 '방사성 물질이 검출될 수 있다'는 괴담성 소문이 돌면서 고철로 변하고 있다. /장려성 기자

연합뉴스

울주군, 한수원 '원전 연계 청정수소 생산 실증사업' 유치

송고시간 | 2024-10-29 16:52



이 사업은 한국수력원자력이 주관하고 삼성물산, 두산에너지빌리티, 현대건설, 한국전력기술, 한국원자력연구원, 한국가스안전공사, 한국가스기술공사, 미래기존연구소, 한국에너지기술연구원, 한국교통대학교, 한국화학융합시험연구원, 한국전력거래소 등 12개 기관이 공동 참여한다.

울산시는 실증부지 인근에 대규모 청정수소 및 수소화합물 생산연합지구(클러스터)를 구축하는 수소 특화단지를 기획 중이다.

이번 유치 성공으로 수소특화단지 조성에 상승효과가 클 것으로 기대하고 있다.

월간수소경제

울진 원자력수소 국가산단, 속도 붙는다...에타면제 통과

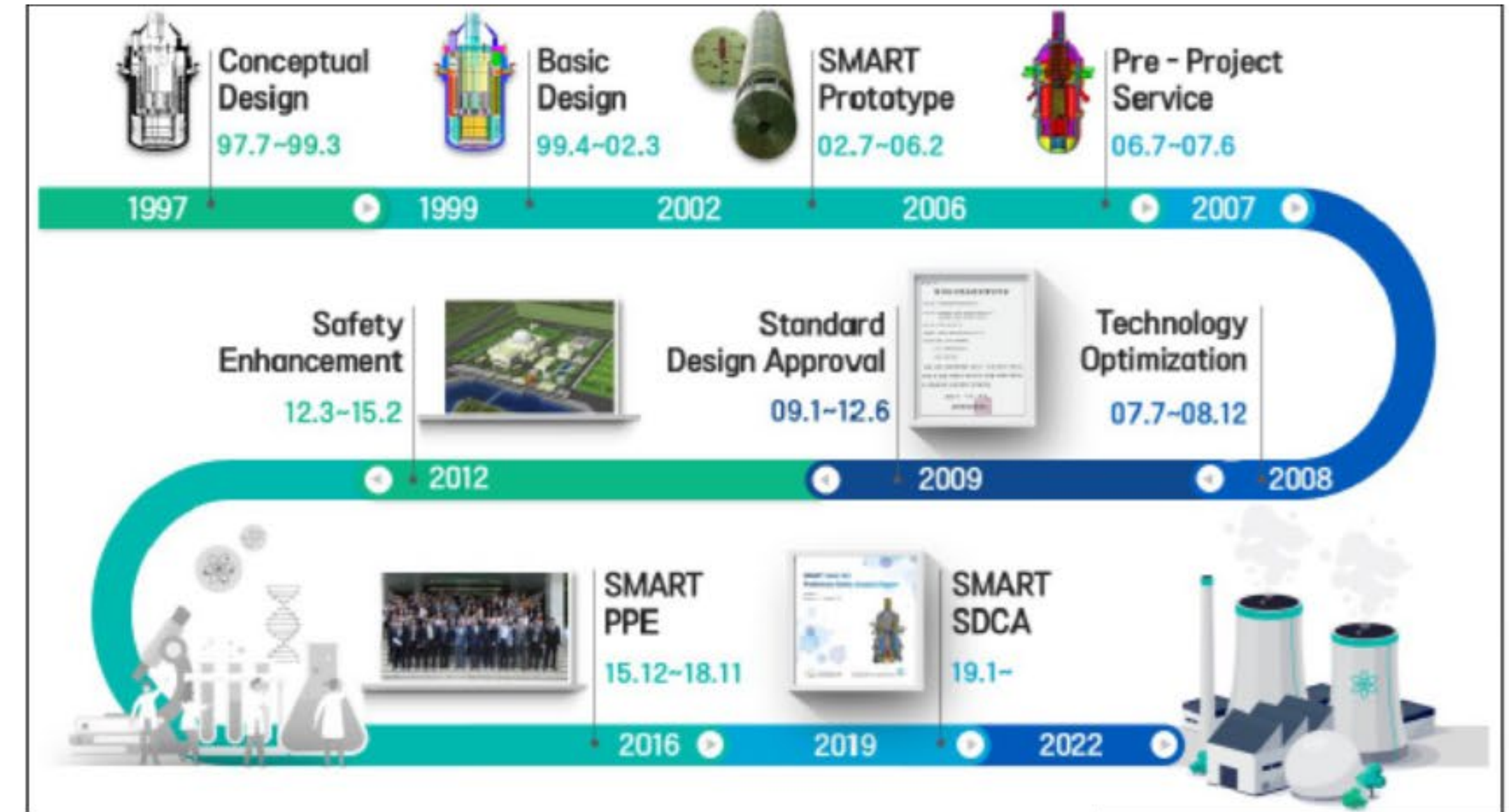
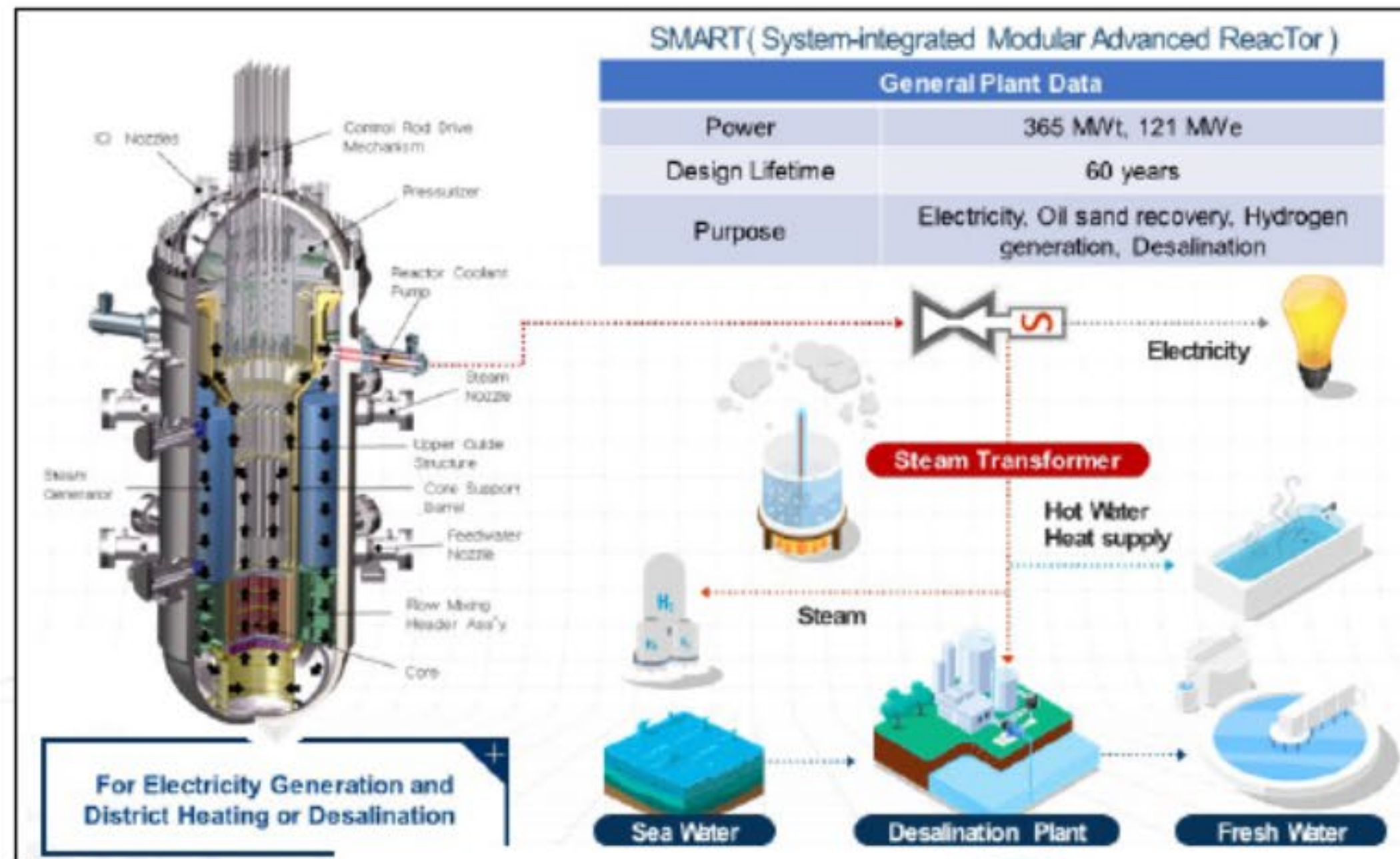
18일 국무회의서 의결...국가산단 중 지방권서 최초
산단 조성계획 및 각종 행정절차 진행



국민 수용성 중요

- 원자력 담수화
- 원자력 수소

17. 경수형 SMR 비발전 활용



Innovative Concept

- ▶ All Major Components in Rx Vessel
- ▶ Modularization for Field Installation and Maintenance
- ▶ Passive Safety System
- ▶ Fully Digitized Control System

Proven Technologies

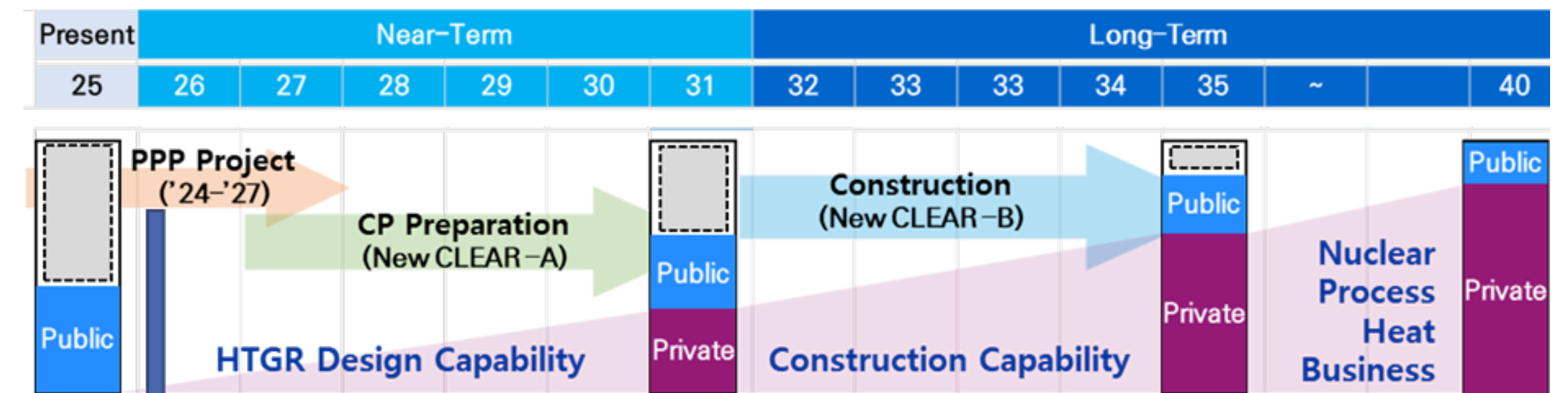
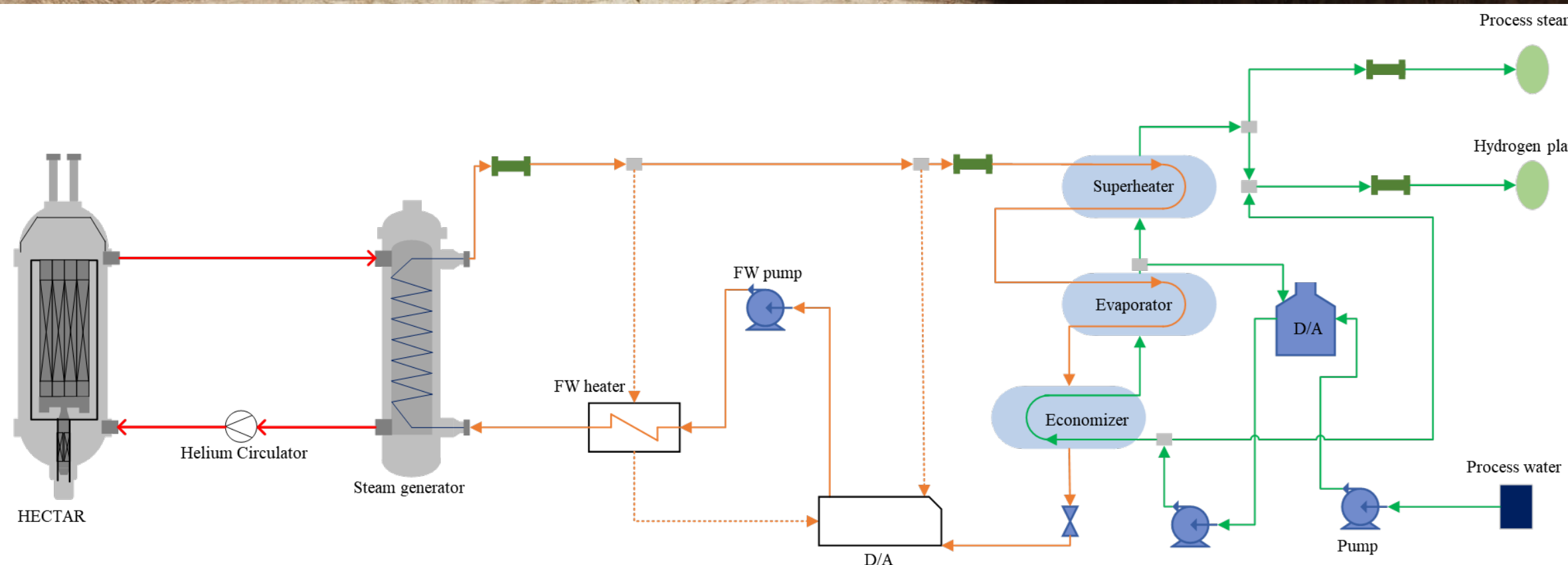
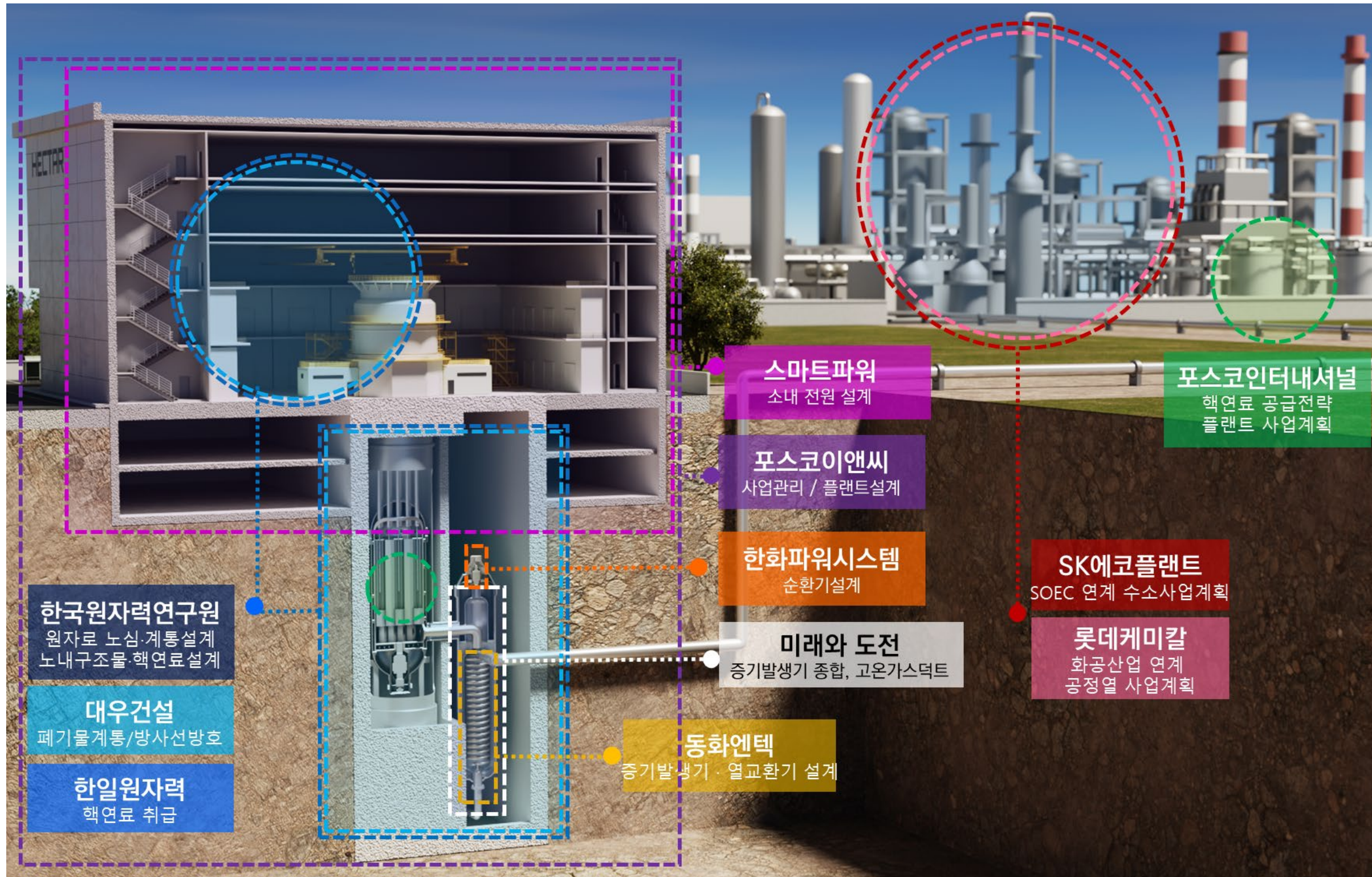
- ▶ 17 x 17 UO₂ Proven Fuel Technology
- ▶ Control Rod Drive Mechanism
- ▶ Reactivity Control Concepts Using BP and Soluble Boron

18. 원자력열이용협의체 (2023.8.11)

- **설립 목적**
 - 원자력 공정열 생산/이용 기술 개발 및 사업 기반 조성
과 원자력 공정열 시스템 실증 사업 촉진
- **주요 업무**
 - 원자력 열 생산/이용에 대한 정보 교류 및 사업 기획 모색
 - 원자력 공정열 생산 및 이용 시스템의 실증 사업 추진 계획 수립 협의
 - 원자력 공정열 생산 시스템의 실용화 기술 개발 촉진 및 인허가 방안 협의
- **참여기관**
 - 원자력(연), 경상북도, 포스코홀딩스, 포스코이앤씨, 롯데건설, 롯데케미칼, 어프로티움, 현대엔지니어링, DL이앤씨, DL케미칼, GS건설, SK에코플랜트, SK인천석유화학



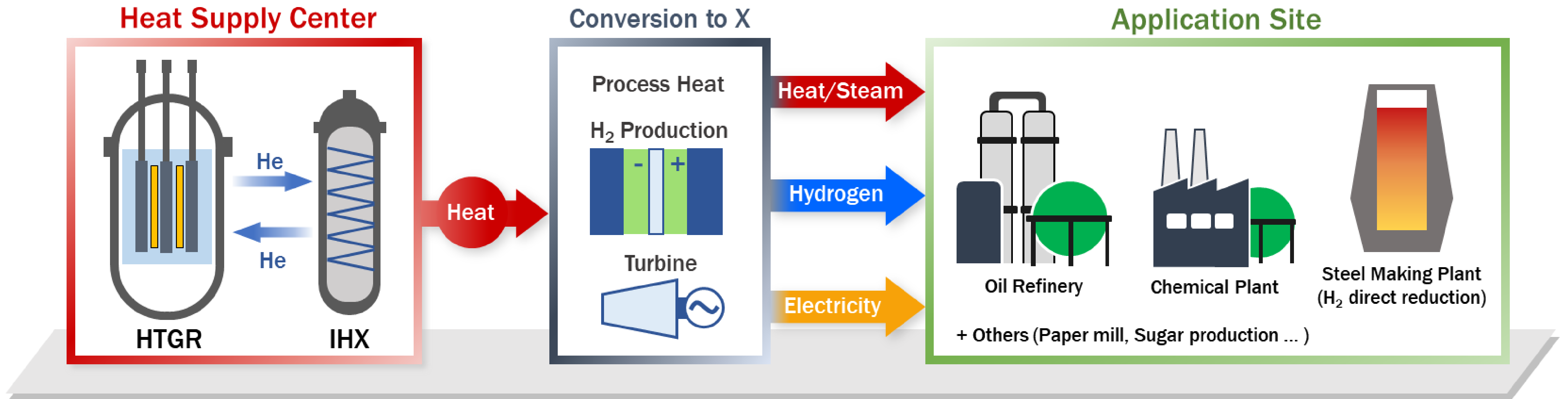
19. 한국원자력연구원의 고온가스로 개발



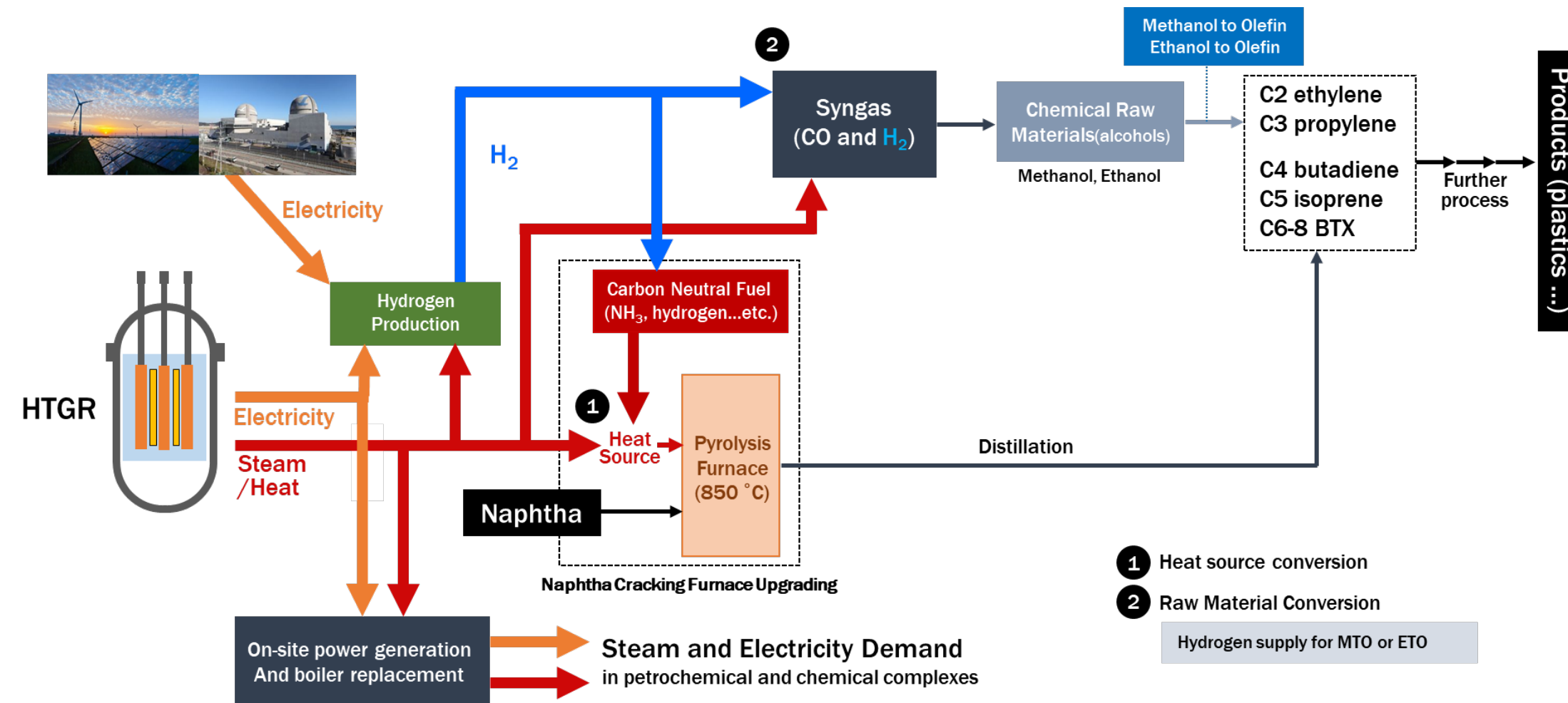
(`24~`25) 개념설계
 (`26~`27) 기본설계
 정부: 255억, 민간 232억원

열출력 90MWth, 노심출구온도 750℃, 고온증기 생산

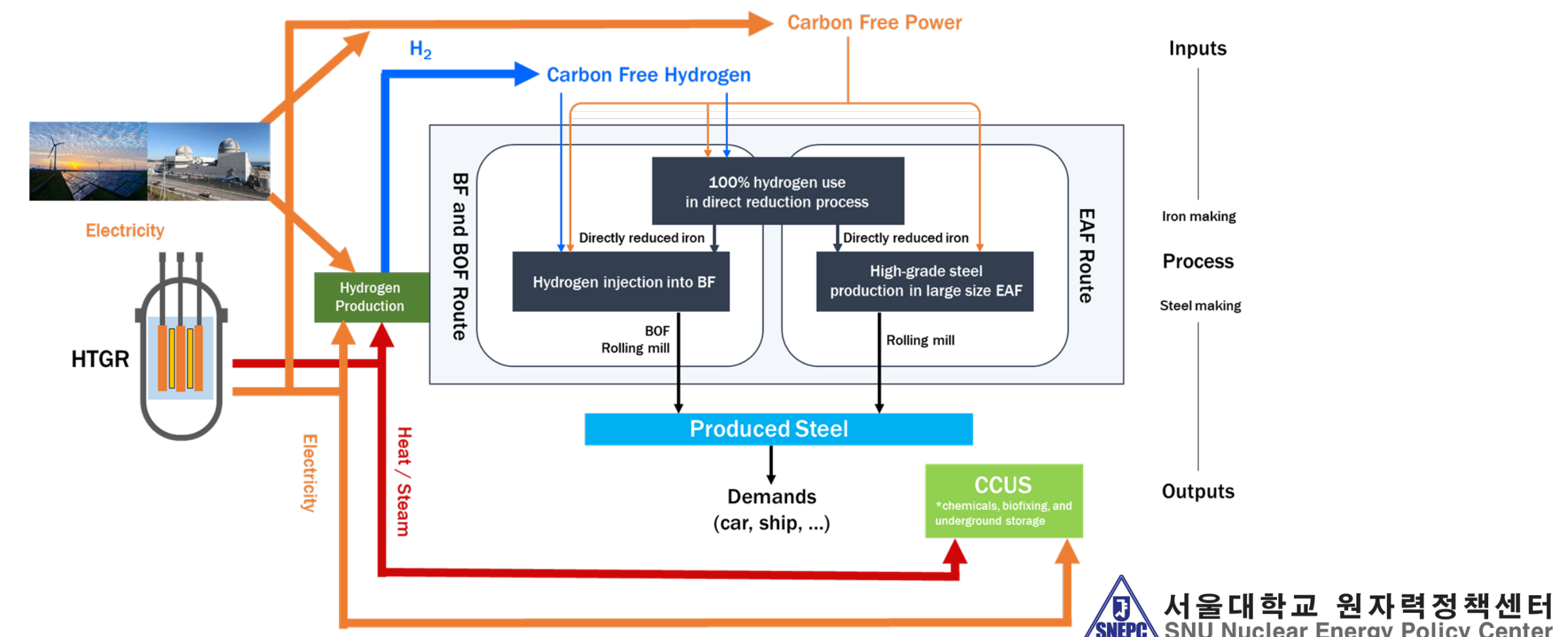
20. 고온가스로 활용 분야



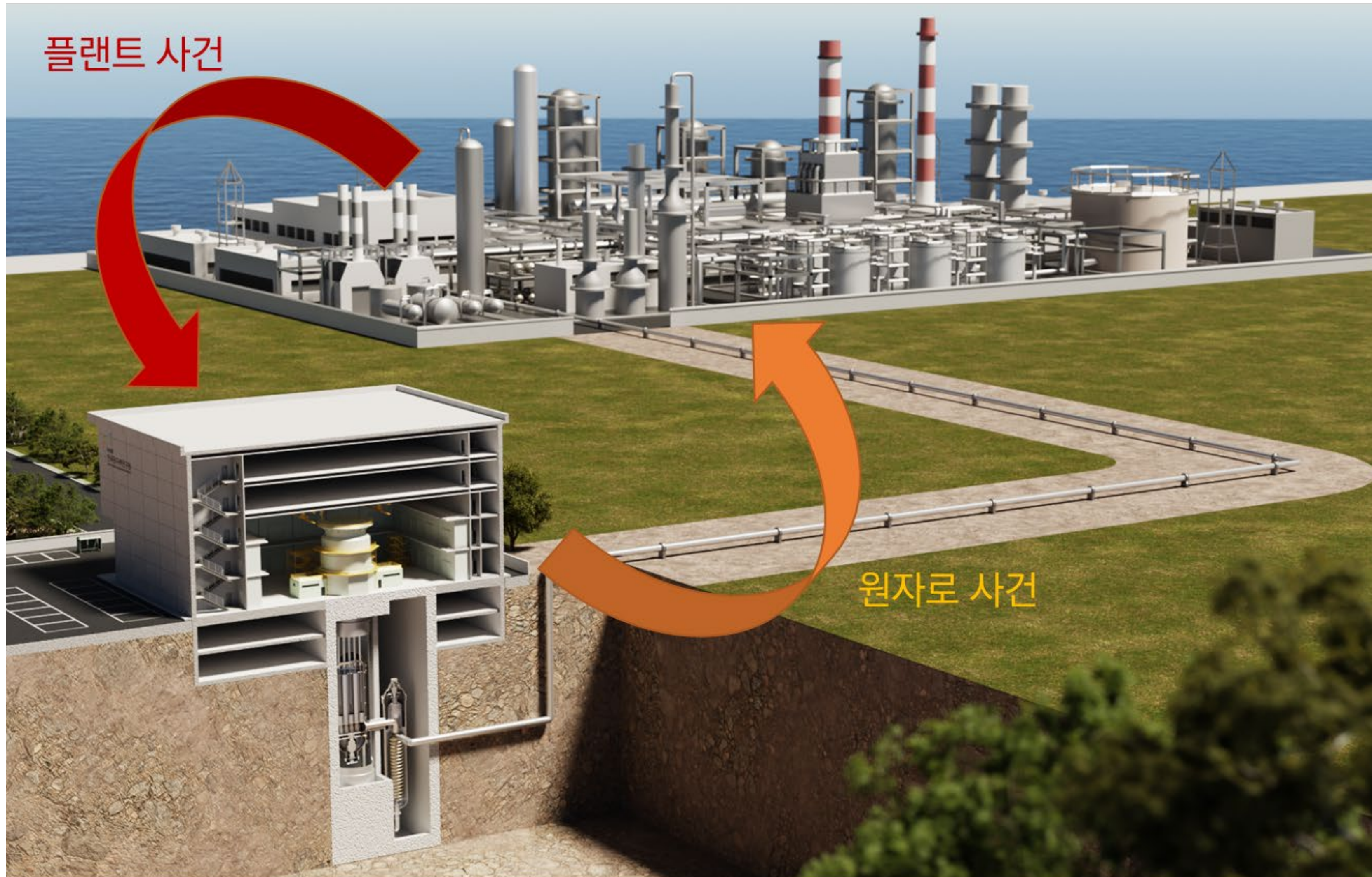
Industrial Complex



Steel Industry



21. 원자력비발전활용 인허가 고려사항 및 추가 현안





- 인허가 고려사항
 - 외부 재해 고려 설계
 - 자연 재해/사회 재해
 - 부지 선정
 - 다중방벽
 - 경계 차단 설계
 - 운영 탄력성(필요 시)
 - 기존설비 활용 여부



- 추가 현안
 - 원자력과 산업 플랜트 사이의 상이한 설계 기준과 위험도 평가 기술
 - 원자력과 비원자력 명확한 경계 필요
 - 원자력 증기/기체 방사능 측정 기준

22. 원자력비발전활용 인허가 현안

원자력과 산업시설 설계 개념






-  단기: 원자로와 산업시설의 분리 (다른 부지에 건설)
-  중/장기: 원자로와 산업시설이 동일 부지 내 건설

원자로와 산업시설 분리 경우 인허가 현안 최소화




-  설계와 운전 관련 안전 고려 사항 최소화
-  산업시설이 원자로 운영에 미치는 영향만 평가
 - 산업시설 오작동에 따른 원자로 긴급정지
 - 원자로에 비해 낮은 산업시설의 SSC 신뢰도
 - 전력과 증기를 off-grid로 공급 시 수요 가변에 따른 탄력 운전 요구

23. 원자력비발전활용 설계 및 추가 외부 사고 고려사항

열공급 시스템 설계

-  사용자와 원자로 완전 분리
-  가변 열부하 효율적 대응
-  가스발전 및 재생에너지 저장장치와 연계 운영
-  보조 서비스 제공 가능(열병합 발전)
-  열병합 설비 수준의 간단하고 신뢰성 높은 서비스 제공 필요

추가 외부 사고 (동일 부지 건설 시 중요)

-  화재: 고열유속/연기, 제트화재, 섬광화재
-  액체 및 유독성 화학물질 유출
-  폭발: 반사압, 동압, 폭발 비산물, 가연성 증기운

24. 활용 분야에 따른 외부 재해 고려 사항

공통

- 화재 및 이송 사고

원자력 수소

- 수소 폭발, 수소 화재, 수소 제트 화재
- LNG 폭발 및 화재 (블루수소나 청록수소 연계 시)



화학플랜트

- 공정에 따라 평가 필요
- 화재, 폭발, 유독물질 누출

25. 외부 재해 완화 방법

공통: 안전거리




폭발

-  방유제(액체 확산 방지를 위한 탱크 주위 둑 혹은 턱)
-  불활성화(불활성기체 치환), 배기, 제어연소(예시: 재결합기)

화재





-  방화벽, 구획 격리, 탐지 및 소화

유독물질 누출

-  HVAC 필터 및 음압 HVAC
-  유독물질 탐지 및 차단
-  원자로 건물 내 HVAC 입구덕트 필터

26. 미국 NRC의 원자력 비발전활용 인허가 현황

미국내 원자력비발전활용 사업

-  Long Mott Generation Station: 화학산업(X-energy社の의 Xe-100)
-  Nine Mile Point Nuclear Station: 수소 생산
-  Kemmerer Power Station: 열저장
-  SHINE Technologies, LLC: 의료용 동위원소 생산

ADVANCE Act Section 203 (2024)

의회 보고서 제출 요구 사항

- 출력 증감발 운전, 전기 생산과 비발전활용 간 전환 등의 유연 운전
- 차세대 원자로 비발전 활용 / 산업시설 또는 동일부지에 원자로 배치

인허가 쟁점 및 요건 기술 요구 분야

- 수소 및 화학물질 생산, 해수 담수화 및 폐수 처리
- 산업공정열 활용, 지역난방, 에너지 저장 연계 활용
- 동위원소 생산

주요 쟁점 예상 분야

- 비상계획구역(EPZ), 물리적 방호(산업시설 인접), 환경영향평가 간소화(기존 설비 환경영향 평가)

27. 고온가스로 안전 철학



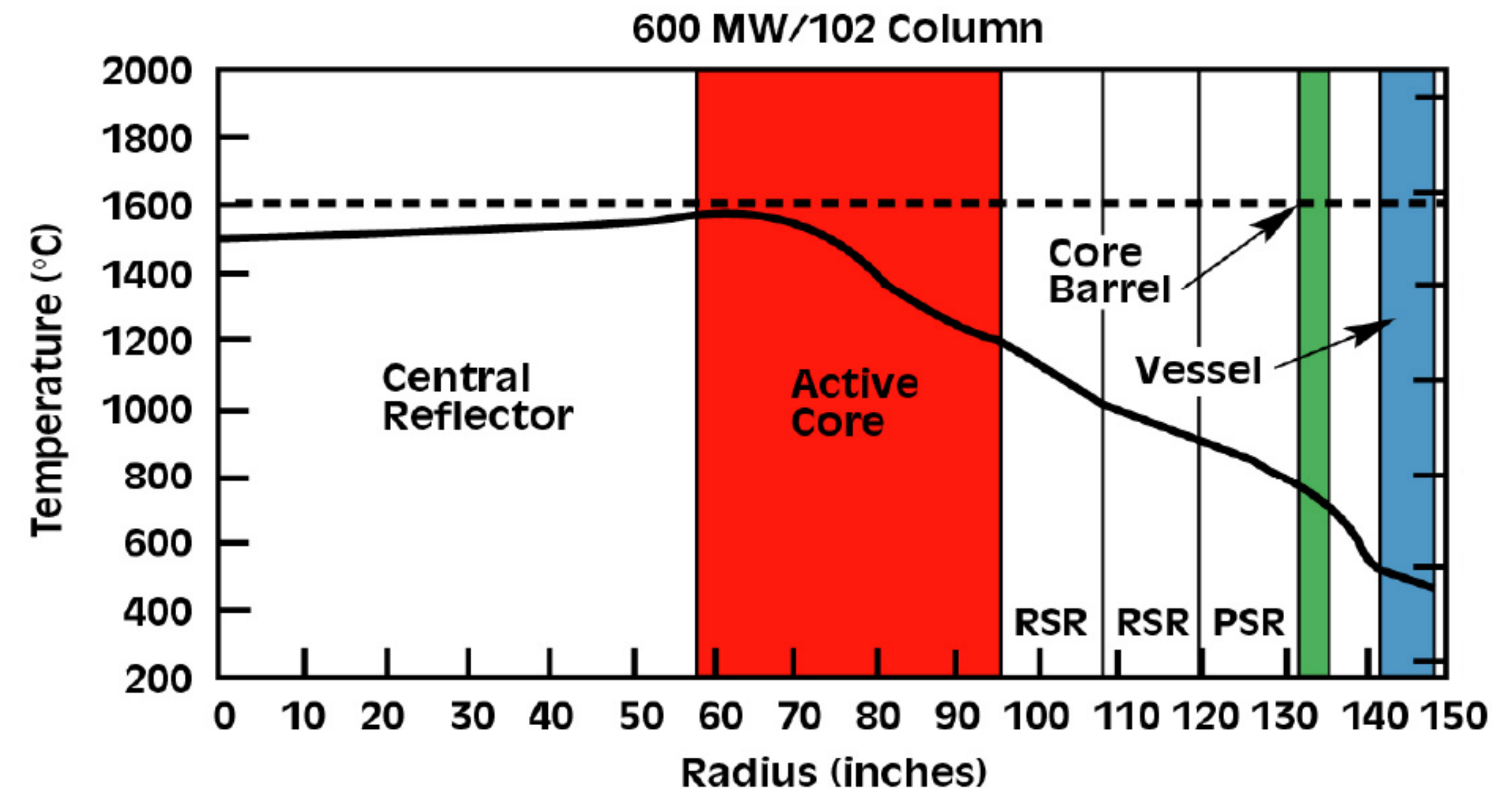
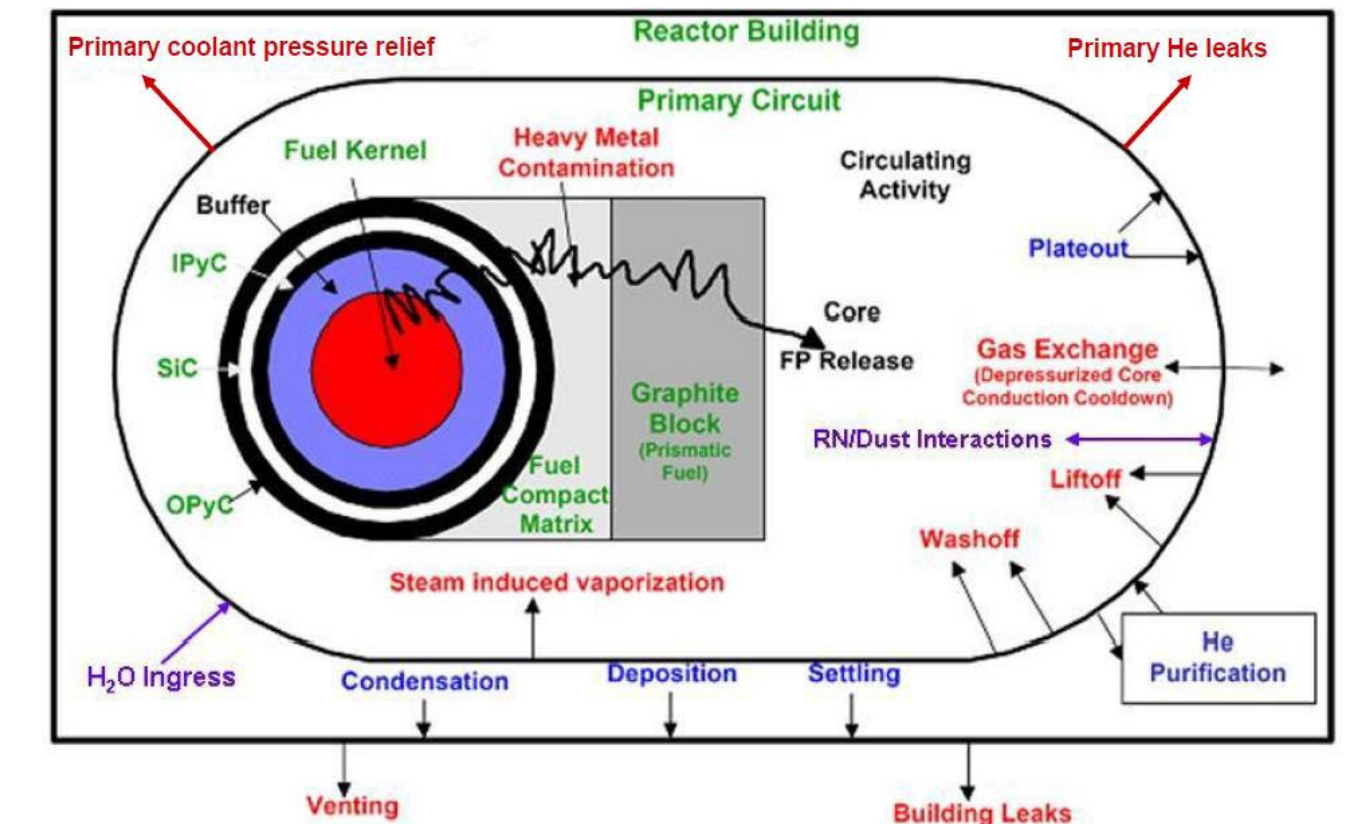
설계방법

- 방사성물질 관리(피복입자핵연료 內, 손상률 $O(10^{-4})$ 수준)
- 배제원칙 : 능동계통과 작업자 조치



방지와 완화

- 재료 고유 안전 특성
 - 헬륨, 피복입자핵연료, 흑연
- 단순 모듈 설계
 - 출력 밀도 제한 $O(10^{-1})$, 원자로용기 매립 설치
- 피동특성 극대화
 - 높은 陰의 온도 반응도
 - 높은 열慣性
 - 냉각재 無關 피동잔열제거 (전원 불필요)



28. 고온가스로 HECTAR PDC

- 고온가스로 HECTAR에 대한 일반설계기준(General Design Criteria)의 적용성 제시
 - 참고 : RG-1.232 Guidance for Developing PDC for non-LWRs (2018)
 - 설계에서 충족시켜야 할 기준 수립 : PSAR/FSAR 3.1절 미국원자력규제위원회의 일반설계기준 준수

PDC 작성 요약

- Criteria 41개로 구성 (GDC 55개)

Category (Criteria)	Same as GDC	Modified or Added	Not Applicable
I. Overall Requirements (1-5)	1	4	—
II. Multiple Barriers (10-19)	3	7	—
III. Reactivity Control (20-29)	7	2 (1 [*])	—
IV. Fluid Systems (30-46)	1	8	8
V. Reactor Containment (50-57)	—	—	8
VI. Fuel and Radioactivity Control (60-64)	3	2	—
VII. Additional Technology-Specific Design Criteria (70-72)	—	3	—
Total	15	26	16

* Combined

29. HECTAR PDC의 경수로와 비교

- 냉각재상실사고 (Loss-of-coolant accidents)
 - 가상사고에서 열제거에 고온가스로 냉각재 헬륨이 필요하지 않음
- 잔열제거 (Residual Heat Removal)
 - 비상노심냉각(Emergency Core Cooling)은 적용하지 않고 잔열제거로 통칭하여 적용
 - 정상운전 및 예상운전과도의 잔열제거와 가상사고의 피동잔열제거를 구분하여 적용 (비고: mHTGR은 피동잔열제거로 적용)
- 격납 (Containment)
 - 격납건물 관련 기준 대신 원자로건물 설계 기준(Reactor Building Design Basis) 적용
- 전력계통 (Electric Power System)
 - 소내/소외로 구분된 전력계통 기준을 자체 전력생산이 없는 HECTAR에 맞도록 수정 적용

30. HECTAR의 다중방벽

경수로와 고온가스로 다중방벽 비교

방벽	경수로	고온가스로
1차	핵연료 펠렛	TRISO 커널
2차	핵연료 피복관	TRISO 피복층, 컴팩트
3차	원자로냉각재압력경계	원자로냉각재압력경계
4차	격납건물	원자로건물

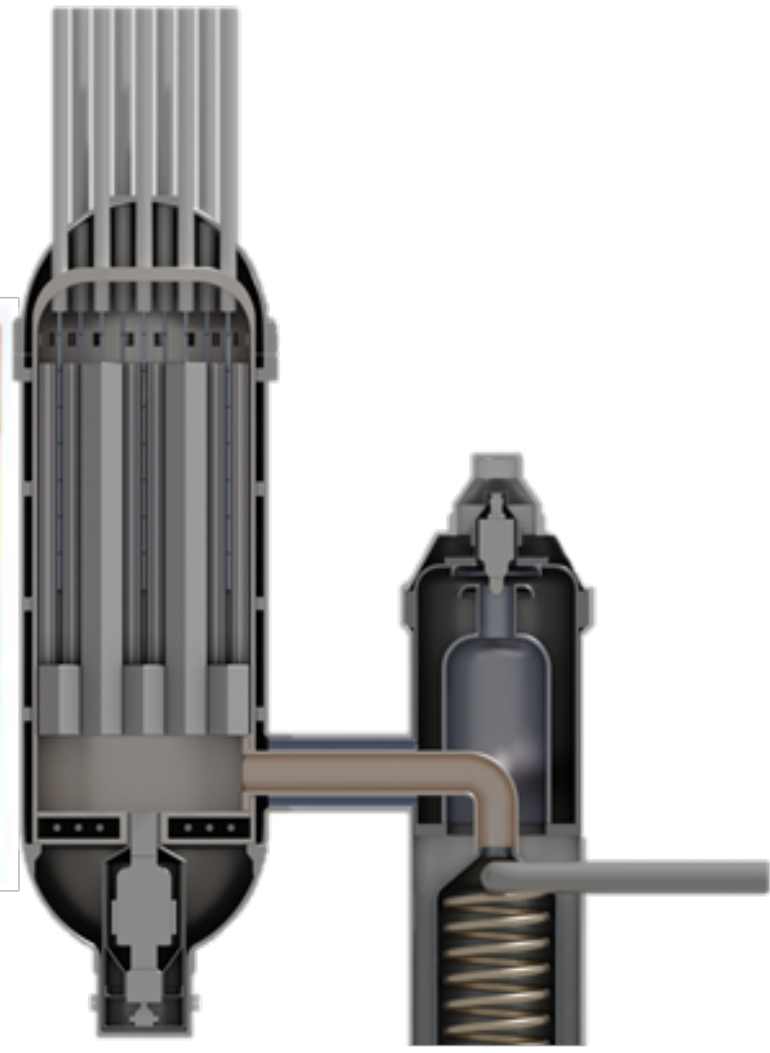
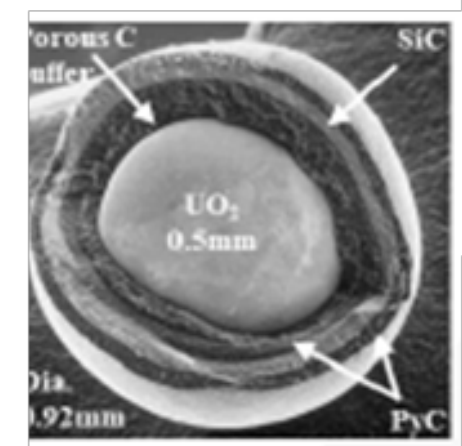
- ❖ TRISO 입자는 다중방벽 (커널+PyC+SiC+PyC) 구성으로 핵분열 생성물 격납 기능 제공
- ❖ 컴팩트는 TRISO를 결합하는 흑연 구조재로, 핵분열 생성물 누출 제한

- ❖ 원자로냉각재압력경계 및 원자로건물은 사고시 핵분열 생성물 누출 저감

TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth

TRISO particles cannot melt in a reactor and can withstand extreme temperatures that are well beyond the threshold of current nuclear fuels.

Office of Nuclear Energy



TRISO
역할

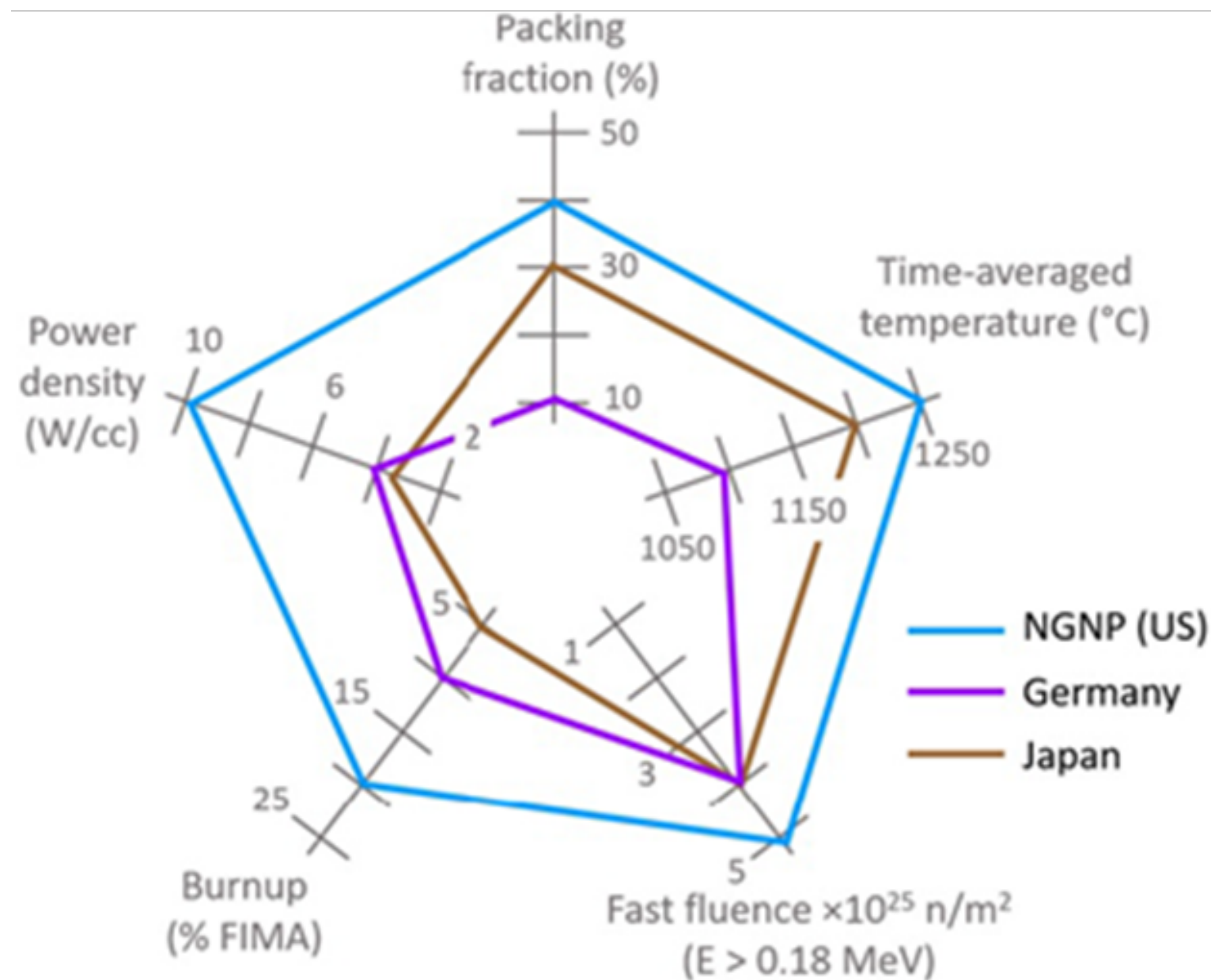
Defence-in-Depth Levels					
Level 1	Level 2	Level 3	Level 4		Level 5
Plant States (considered in design)				Off-site emergency response (out of the design)	
Operational States		Accident conditions			
Normal operation	Anticipated operational occurrences	Design basis accidents	Design extension conditions		
			Without significant fuel degradation	With core melting	

31. 기능성 격납건물

구분 항목	HTTR (일본)	HTR-PM (중국)	MHTGR (미국)
운영 인허가 시기	1990년대 후반	2021년	2030년 예상
격납 방식/명칭	강철 격납용기	저압 배기형 격납(VLPC)	배기형 격납건물
격납 건물 설계 압력	0.39 MPa	대기압 수준 (배기형)	대기압 수준 (배기형)
구조물 재료	강철	강화 콘크리트	강화 콘크리트 (지하)
주요 방사성 물질 방호벽	격납용기(최종 방호벽)	TRISO 연료(1차 방호벽)	TRISO 연료(1차 방호벽)
결말해석	결정론적 심층방호	리스크 정보 활용/확률론적	리스크 정보 활용/역학적선원항
규제 기반	개정된 경수로 규칙 (METI/NRA)	확률론적 목표를 포함한 개정된 경수로 규칙 (NNSA)	신규 규제 체계 제안 (USNRC)
격납건물 기능	압력/누설 격납 및 공기 유입 방지	여과 후 배기 및 외부 사건 방호	최소 선원항 격납 및 외부 사건 방호

32. 피복입자핵연료 파손률

- 중국 : HTR-PM의 UO₂ pebble 공급을 위한 30만 페블/년 수준의 상용규모 시설 보유
- 미국 : UCO 피복입자핵연료 인허가 및 상용 제조 역량 확보를 위해 DOE AGR 프로그램 지원
 - EPRI의 UCO 피복입자핵연료 성능 Topical Report 승인 ('19.05 신청, '20.05 승인)
 - NRC의 선진원자로 핵연료 자격화 지침 발간 ('22.04)
 - Xe-100, KP-FHR, eVinci는 AGR 성능 자료 (EPRI-AR-1) 및 NUREG-2246에 기반하여 핵연료 인허가 추진



Fuel Qualification for Advanced Reactors

Final

Manuscript Completed: February 2022
Date Published: March 2022

Prepared by:
T. Drzewiecki
J. Schmidt
C. VanWert
P. Clifford

Jordan Hoellman, NRC Project Manager

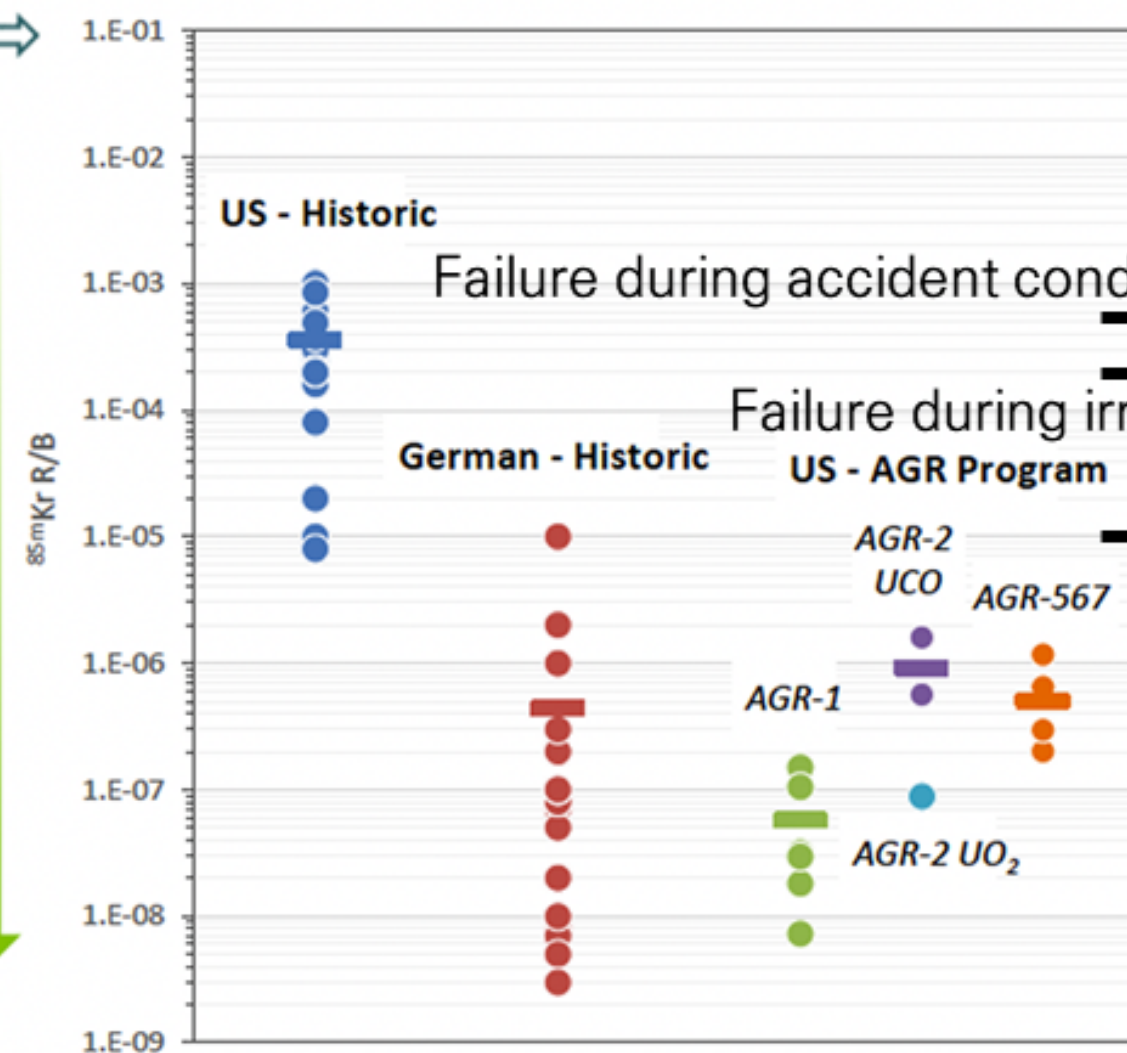
Office of Nuclear Reactor Regulation

Image from P. Demkowicz, INL "AGR Program Overview," Gas-Cooled Reactor Program Review Meeting, July 25, 2023, Virtual

Comparison of US and German ⁸⁵Kr R/B data

Log scale! →

Better performance ↓



Source of release:
• Uranium contamination
• Particle failure
• Diffusive transport

As-fabricated defects

~1,000,000 particles, better than 2 orders of magnitude in R/B compared to US historic

*R/B only recorded for AGR-2 and AGR-5/6/7 for part of irradiation

33. 예비 방사능 평가(최대가상사고 기준, 고리부지 참조)

 제한구역경계
 300m

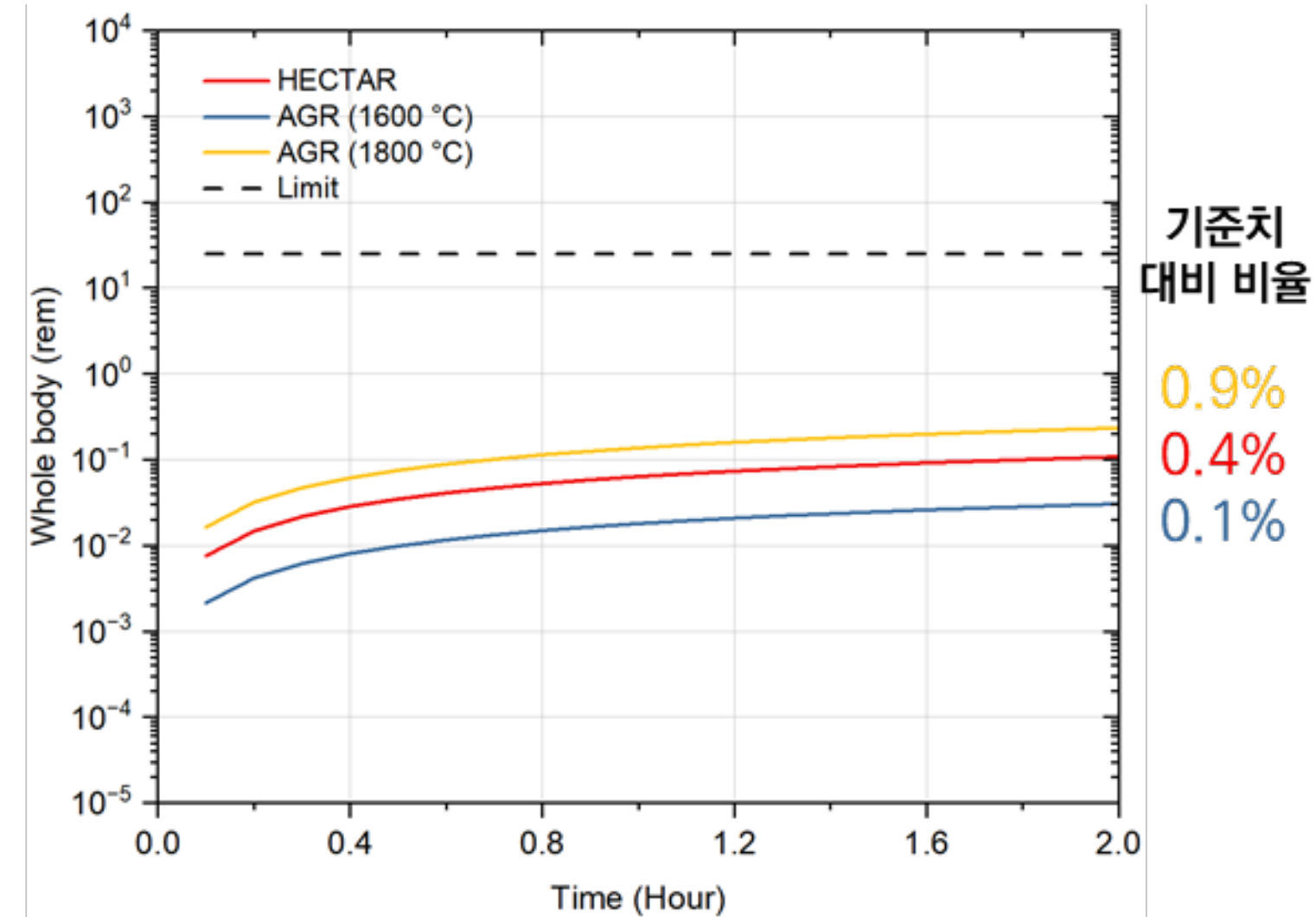


그림. 제한구역경계 전신선량

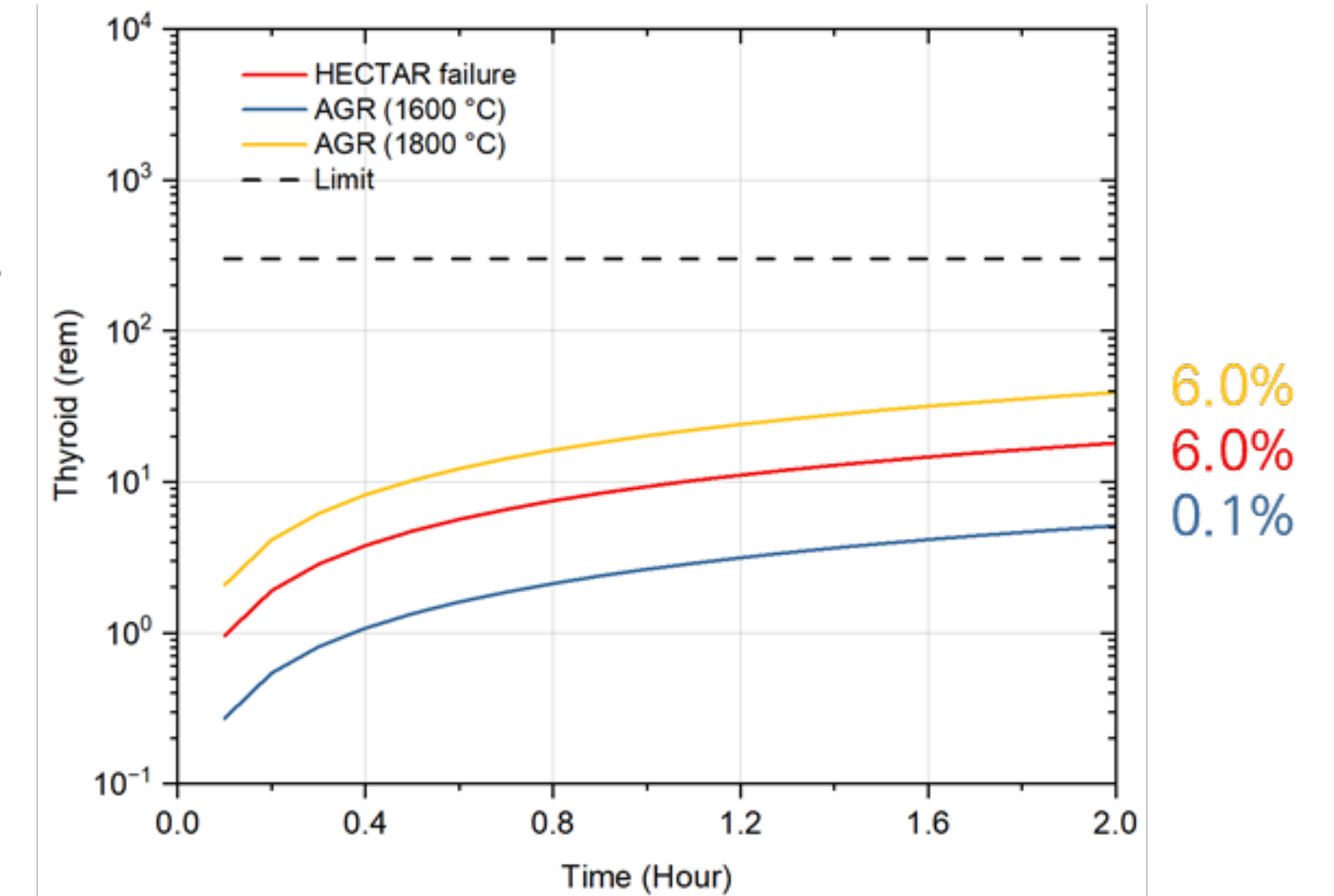




그림. 제한구역경계 갑상선선량

 저인구지대
 2,000m

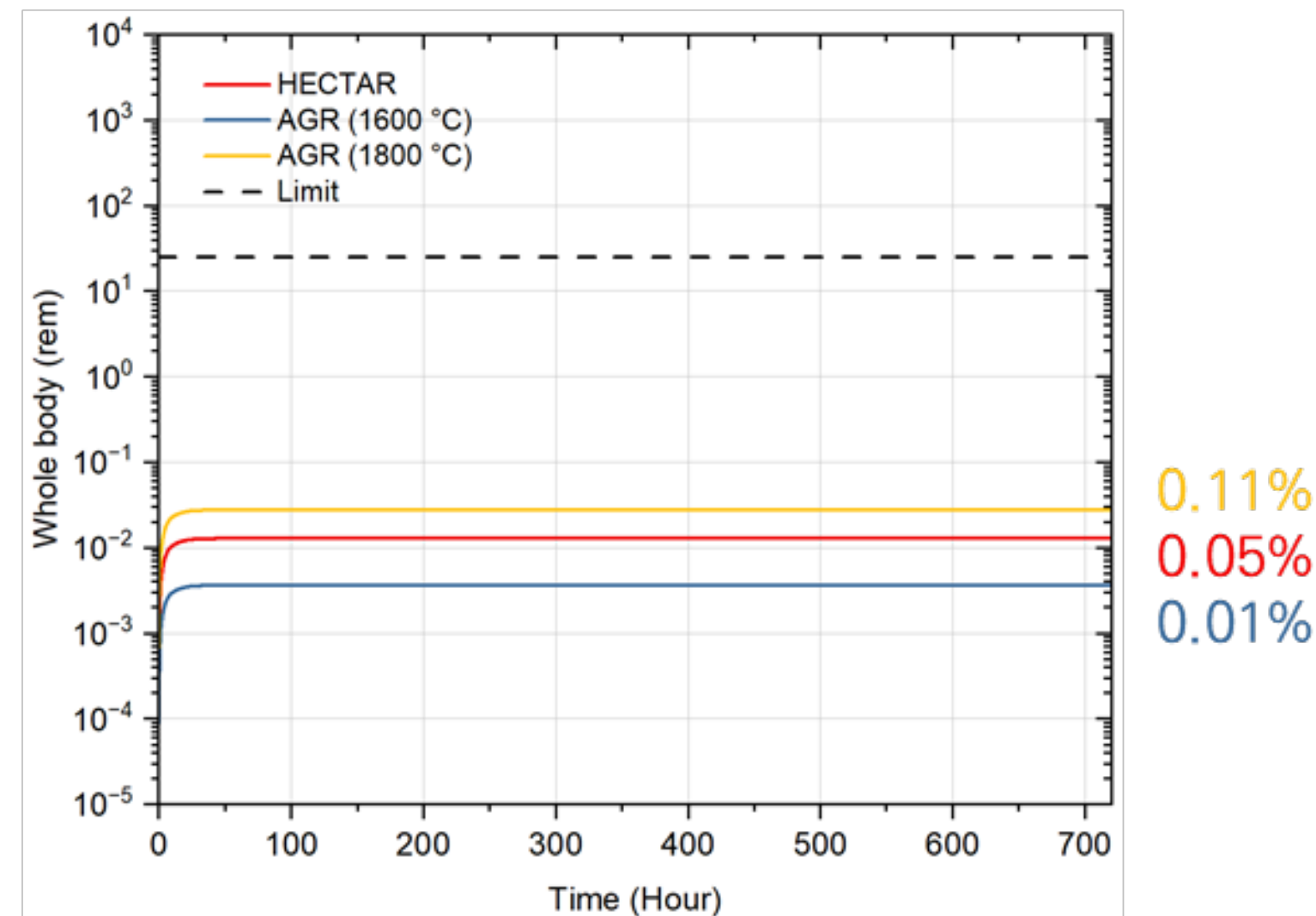


그림. 저인구지대 전신선량

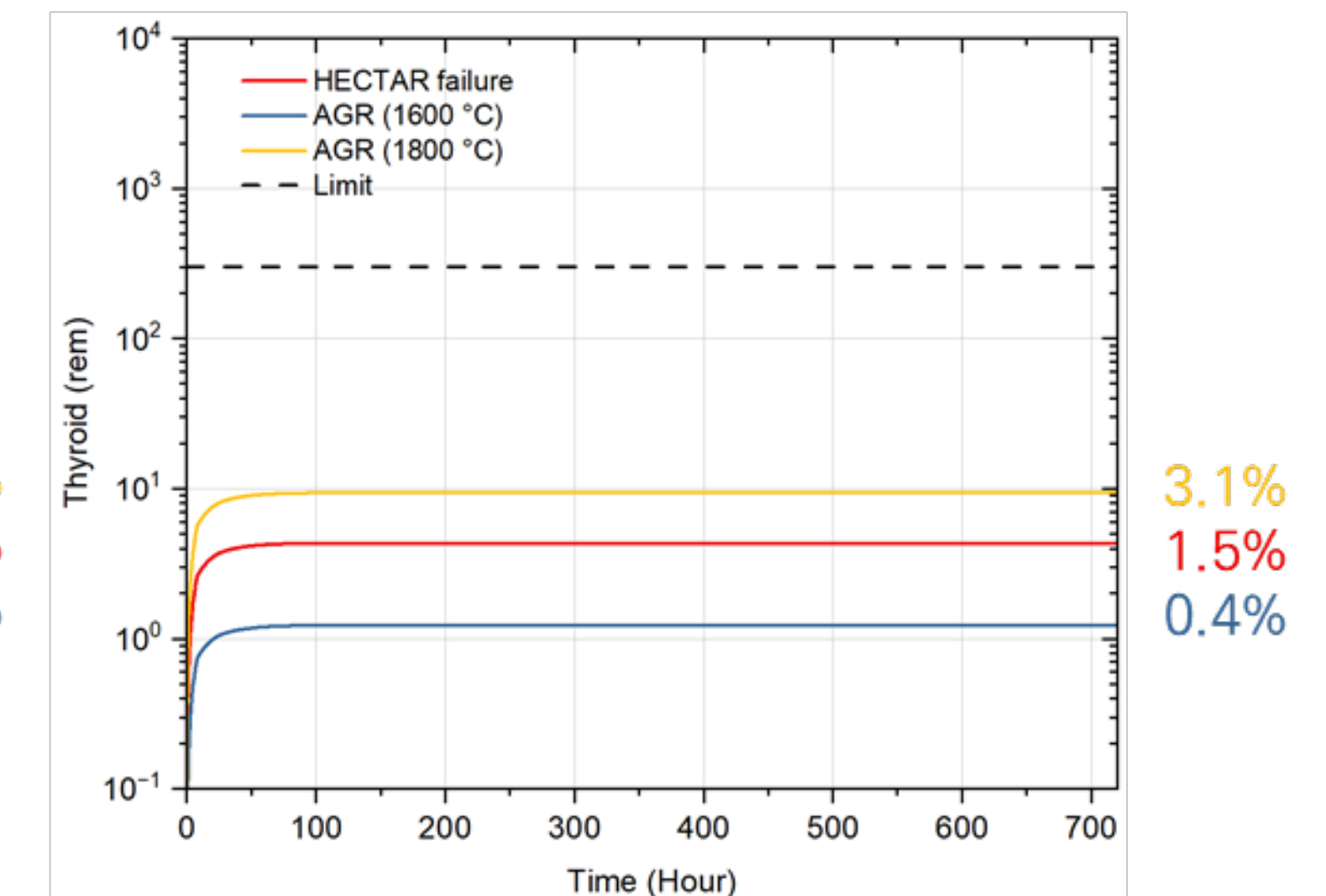


그림. 저인구지대 갑상선선량

34. SMR 비상계획 구역 재평가 요구

■ 국내 대형 원전 비상계획구역 기준으로서는 비발전활용 사업 불가능

원자로 분류	PAZ	UPZ
발전로	3~5 km	20~30 km
연구로(50~100MWth)	—	5 km
연구로(10~50MWth)	—	1.5 km
연구로(2~10MWth)	—	0.5 km

■ 미국

- NUREG-0396 발간 이후 비상계획구역은 16km로 규제요건화
- 250MWth 이하는 개별 평가 요구
- 10CFR50.33에 따르면 SMR EPZ는 방사능 방출 시 4일간 10mSV 초과지역과 사전에 정해진 주민 보호조치 신속이행이 필수적인 지역

■ IAEA는 SMR의 경우 PAZ(0.5~3 km), UPZ(5~30km) 권고

35. 산업공정열 고온가스로 관련 인허가 전략(안)

- **열 공급용 고온가스로 법적 지위와 적용 기준 명확화**
 - 발전용 원자로와 연구용 원자로로만 규제
 - 열 생산 원자로는 발전설비 없고, 열을 상업적 활용

- **고온가스로 인허가 시현성**
 - 피복입자핵연료 (NRC 인증 핵연료 수입 예정)
 - 기능성 격납건물
 - 안전등급 설정
 - 기준 명확화 및 준용
 - 개방 3차계통 활용을 통한 인허가 현안 최소화 (두 계통간 피드백 배제)
 - 산업용수 공급계통만 PSAR에 포함
 - 장기적으로 2차계통 증기발생기 입출구 격리밸브를 경계로 최소화 필요

- **다목적 활용기술에 대한 중복 규제 가능성**
 - 2차, 3차 계통 등의 규제 범위와 안전기준 명확화 필요
 - 원자로 시설 위치, 위치 제한 등
 - 수소, 고압가스, 환경오염시설 관련

36. 맺음말

- 지구 온난화는 현실이며 진행 중 전 분야 탄소 중립 요구
 - 대부분의 관심은 전환 분야에 집중 (원자력 및 신재생), 열에너지 탄소중립 필요
- 안전성이 뛰어난 고온가스로형 SMR의 수요처 근처 건설
 - 수요처 근처에서 공정열 및 수소 생산에 활용 가능
- 모든 에너지원의 장점을 극대화하여 탄소 중립 사회 실현에 기여 필요
 - 경수로(전기), 고온가스로(고온 열에너지), 열에너지 저장(간헐성 흡수) 등
- 원자력-산업분야 융합은 선택이 아닌 필수
 - 산업 경쟁력: 에너지 비용 절감 및 탄소 규제 리스크 해소
 - 기술 선도: '무탄소 열원 공급'이라는 신시장 창출
 - 국가 기여: NDC 목표 달성 및 에너지 안보 강화
- 대형원전 전력 생산 위주의 기존 인허가 제도 선진화 필요
 - 선진원자로 안전성, 비발전활용, 부지 선정 및 비상계획구역 등
- SMR 개발사업은 장기 메가 프로젝트
 - 10년 이상의 개발 기간, 두 분야가 융합하는 신사업 창출 필요, 지역민과 이익 공유

감사합니다.



서울대학교 원자력정책센터
SNU Nuclear Energy Policy Center