

原子力イノベーションの追求

日本原子力学会秋の大会・安全部会企画セッション
SMR等革新炉の安全と安全規制について

2020年9月18日

経済産業省資源エネルギー庁
舟木 健太郎

第5次エネルギー基本計画における原子力の位置づけ①

2030年：エネルギーミックスの実現

- 3E+Sの原則の下、2030年エネルギーミックスの確実な実現を目指すとともに、技術開発を推進する。

原子力 = 長期的なエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源

- ▶ いかなる事情よりも安全性を全てに優先し、原子力規制委員会により世界で最も厳しい水準の規制基準に適合すると認められた場合には、その判断を尊重し原子力発電所の再稼働を進める。
- ▶ 原発依存度を可能限り低減させる方針の下、確保していく規模を見極めて策定した**2030年のエネルギーミックスにおける電源構成比率**の実現を目指し、必要な対応を着実に進める。

[技術開発の推進]

- ▶ 軽水炉技術の向上を始めとして、**国内外の原子力利用を取り巻く環境変化に対応し、その技術課題の解決のために積極的に取り組む必要がある**。その際、安全性・信頼性・効率性の一層の向上に加えて、再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった**多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進**するという観点が重要。
- ▶ 水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、**安全性の高度化に貢献する技術開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進**する。
- ▶ 原子力利用の**安全性・信頼性・効率性を抜本的に高める新技術等の開発**を進める。
- ▶ 人材育成や研究開発等に必要な試験研究炉の整備を含め、**産学官の垣根を超えた人材・技術・産業基盤の強化**を進める。
- ▶ **国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保**して進める。

第5次エネルギー基本計画における原子力の位置づけ②

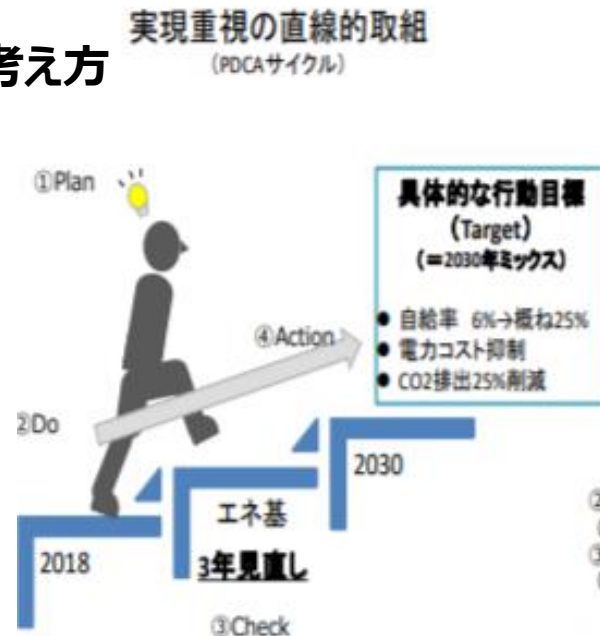
2050年：エネルギー転換への挑戦

- **あらゆる選択肢を追求する「野心的な複線シナリオ」**
- **相対的な重点度合いや開発目標を柔軟に修正・決定**

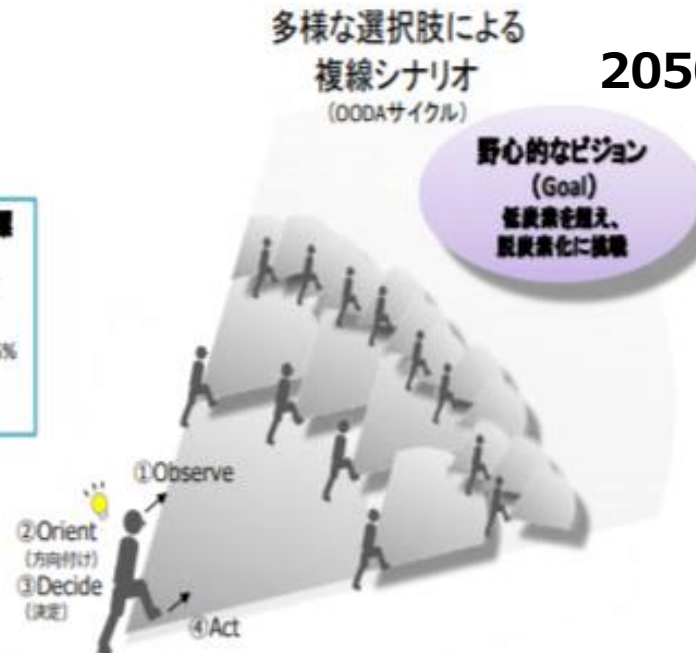
原子力 = 実用段階にある脱炭素化の選択肢

- 東京電力福島第一原子力発電所事故を経験した我が国としては、安全を最優先し、経済的に自立し脱炭素化した再生可能エネルギーの拡大を図る中で、可能な限り原発依存度を低減する。
- 社会的信頼の回復に向け、**人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発**を進めていく

2030年に向けた考え方



2050年に向けた考え方



多様な社会的要請と課題を踏まえたイノベーション創出



イノベーションの創出に向けた取組みの方向

- **安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求に向けて、技術開発に対する支援を強化するとともに、国際協力、人材育成、規制との対話を進めることにより、イノベーション創出を促進。**
(NEXIPイニシアチブ：Nuclear Energy × Innovation Promotion)

革新的な原子力技術開発

- 高速炉
- ・戦略ロードマップ（H30.12）に基づき、**多様な高速炉技術**の競争を促進。



高速炉

- 革新炉
- ・**社会課題に対応する革新的な**原子力技術開発を支援。



小型軽水炉



高温ガス炉

研究機関の連携・民間活用の促進

- 日本原子力研究開発機構（JAEA）を通じ、民間の取組を活性化
- ・データ、知財等の**知見の共有・提供**
- ・試験研究**施設の供用** 等



常陽：高速実験炉

国際協力・企業連携

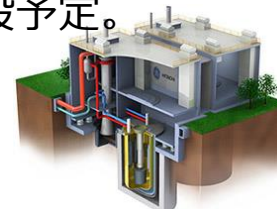
フランス

- ・ナトリウム冷却高速炉の開発
- ・その他の**多様な概念の検討**
- ・**シミュレーションや実験**等のR&D

米国

- ・GAINイニシアチブにより、革新的な原子力技術の開発を促進
- ・この支援を受けて、**小型軽水炉**が2026年に商業運転を見込む。

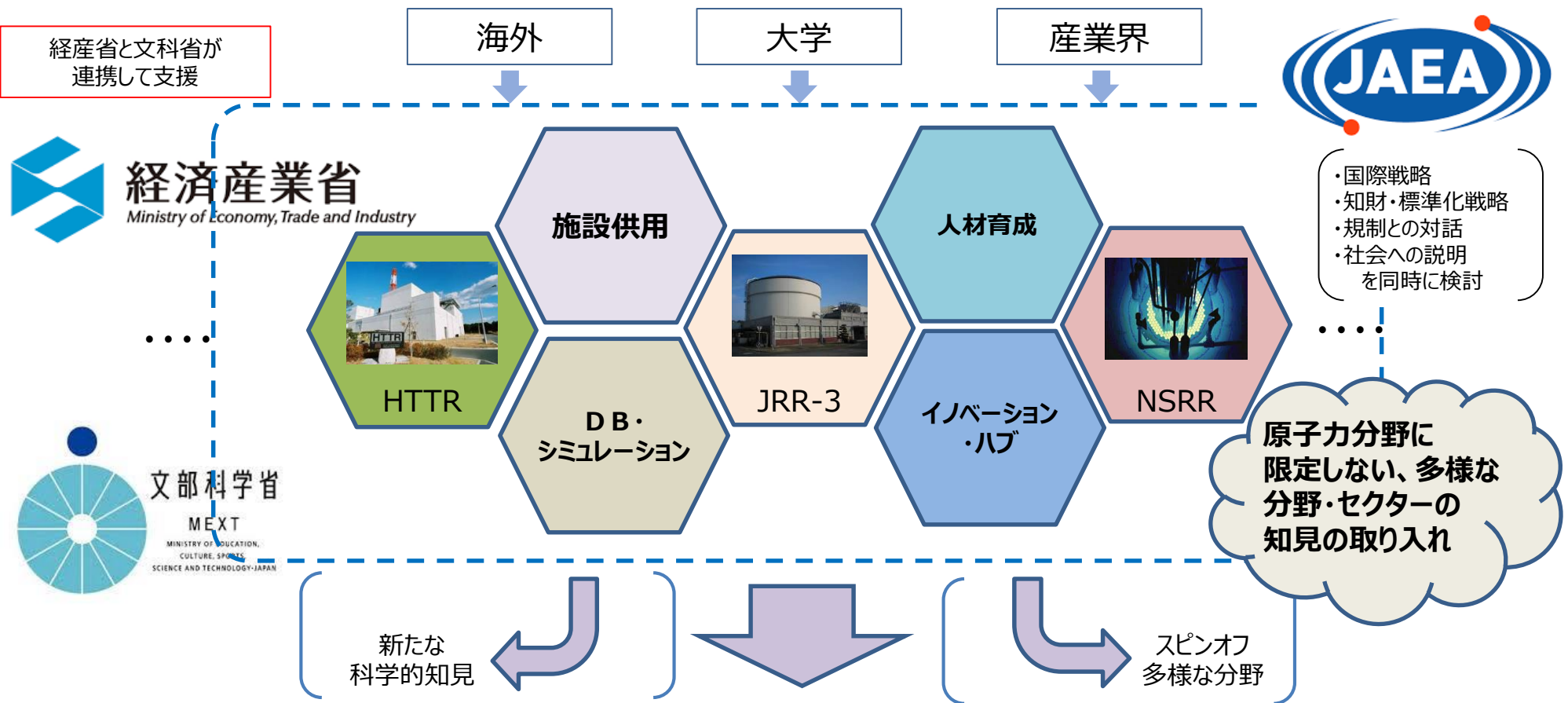
- ・国内技術維持のため、新たに**高速炉の多目的試験研究炉（VTR）**を建設予定。



イノベーション創出に向けた研究開発基盤

※文部科学省原子力科学技術委員会資料より

- JAEAが持つ**研究基盤の供用を通じ**、「日本で唯一の原子力に関する総合的研究開発機関」として、原子力イノベーションを下支え。
- 他分野・他セクターとの対話・知見の取り入れの促進などにより、**産業界・大学・海外を繋ぐハブ**へ。



安全性・経済性に優れた新たな原子力システムの実現

活用が期待されるJAEAの知見・経験

- 研究設備・施設などハード面に加え、試験・評価手法、安全設計の検討などソフト面でJAEAが保有する知見・経験が民間主導の革新炉開発を進める上で有益。
- 非軽水炉型のみならず、軽水炉型の小型炉開発においても、次世代炉開発等に向けたデータ取得・評価手法、安全設計・評価の方法論の検討に係る経験が貴重な参考となり得る。

新型炉・革新炉開発に関わる知見・専門性 [JAEA新型炉開発部門]

- ✓ 革新炉の技術開発、技術基盤整備
- ✓ 新燃料・材料の試験・評価手法
- ✓ 安全設計方針（SDC）、安全設計ガイドライン（SDG）策定・国際提案

軽水炉基礎・基盤に関わる知見・専門性 [JAEA原子力基礎工学研究センター]

- ✓ シミュレーション解析コードなど解析ツール開発
- ✓ データベース整備
- ✓ 分析・計測技術の開発
- ✓ 新燃料・新材料の研究開発 等

1F事故対応・廃炉に関わる知見・専門性 [JAEA福島部門]

- ✓ 事故進展シナリオ分析・評価
- ✓ SA関連基盤研究

安全研究に関わる知見・専門性 [JAEA安全研究センター]

- ✓ 安全研究基盤（試験・評価手法、施設等）
- ✓ 安全評価技術の機能向上・充実

核不拡散・核セキュリティに関わる知見・専門性 [JAEA核不拡散・核セキュリティ・センター]

- ✓ Safeguards by Design
- ✓ Security by Design

革新的な技術開発の支援

軽水炉の安全性向上技術開発

■ 原子力の安全性向上に資する技術開発事業

【対象例】

事故発生リスク低減・被害拡大防止など安全性向上、燃料・材料や新製造技術・工法の開発、デジタル活用等

【令和元年度事業】

上限 5 千万円/件を補助（補助率：2/3、予算 6 億円）。
公募の結果、14 件を採択

革新炉開発

■ 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業

【対象例】

安全性・経済性の向上、エネルギーの多目的利用、廃棄物対策に資する革新的な原子力技術開発等

【令和元年度事業】

上限 5 千万円/件を補助（補助率：3/4、予算 6.5 億円）。
公募の結果、14 件を採択



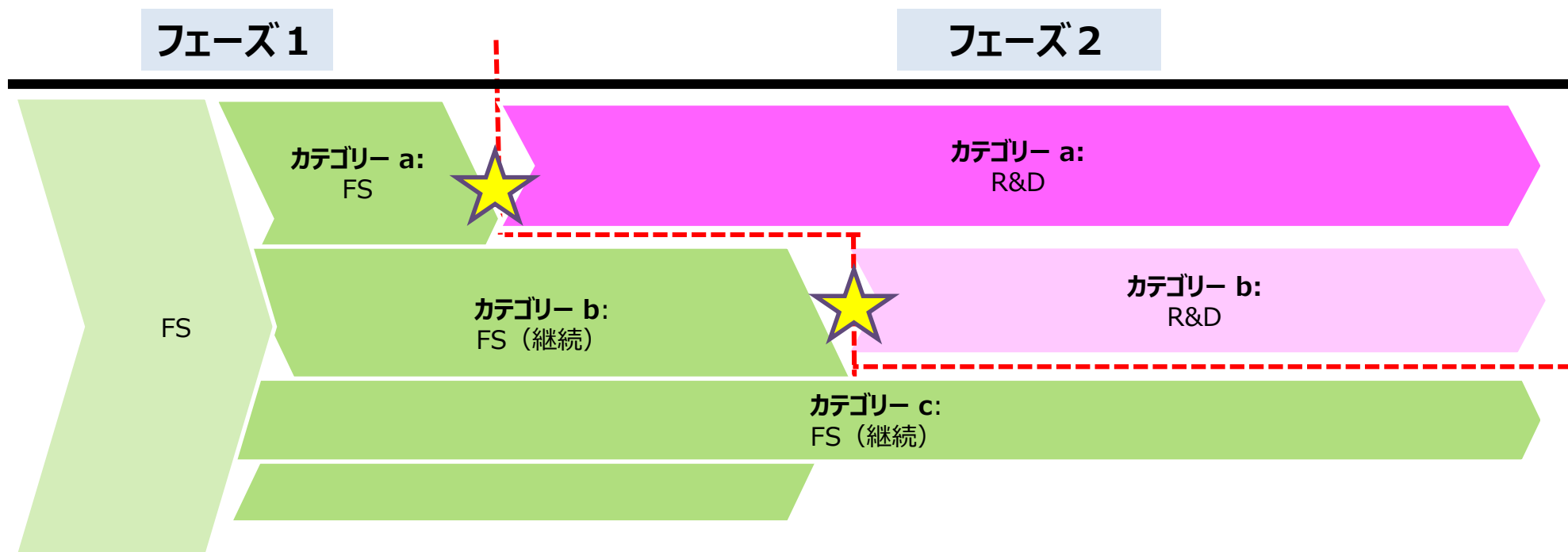
- 民間企業の創意工夫を活かした技術開発提案を支援。
- 令和元年度より、以下の観点から**将来的な事業成立性を有するか否かに関する調査・研究（フュージビリティ・スタディ）**を開始。令和 2 年度以降、支援の重点化を図る観点から適宜絞り込みを行い、技術の熟度やスケジュール等に応じて、技術開発計画の具体化・実施を支援。

- ① 技術成熟度
- ② 市場性
- ③ 開発体制
- ④ 規制対応 等

（備考） 海外機関の参画可能（日本法人や日本企業を幹事としたコンソーシアムによる申請が前提）

技術開発支援の進め方

- 原子力の技術開発は長期に及ぶことに鑑み、技術の熟度や実用化目標時期、開発主体に応じたきめ細かい支援を行い、多様な可能性を追求することが必要。
- 各ステージにおいて、ユーザー（電気事業者、金融、関連業種等）の視点も取り入れた絞り込みを実施し、将来の事業化を見据えた効率的な開発を指向。
 - － フェーズ 1：事業成立性に関する調査・研究（FS）
 - － フェーズ 2：技術開発を通じた事業化に向けた更なる検討

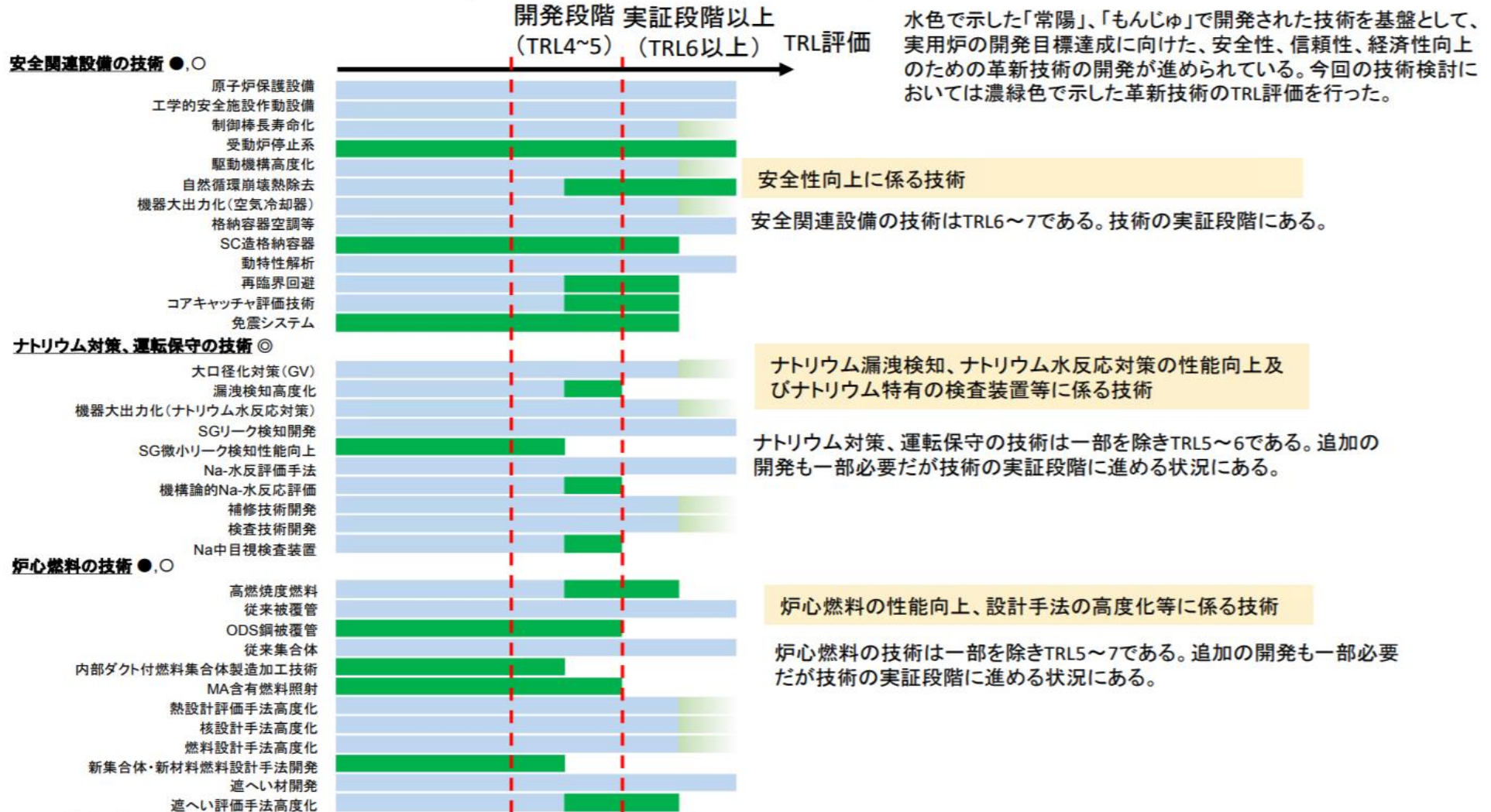


徐々に技術を絞り込み、熟度に応じて支援の優先順位を方向付け

事業成立性評価の観点① 技術成熟度

[参照例] 高速炉開発会議戦略WGにおける高速炉技術の技術成熟度評価結果

高速炉技術の技術成熟度(TRL)評価結果



出典：高速炉開発会議戦略WG第10回資料4

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/010_04_00.pdf

事業成立性評価の観点① 技術成熟度

[参照例] INLによる第4世代炉の技術成熟度（TRL）評価

	GFR	LFR	SFR		VHTR	MSR	
	EM2	Gen4	AFR-100	PRISM	SC-HTGR	FHR	LF-MSR
Nuclear Heat Supply	2	3	3	5	5	3	3
Heat Transport	3	3	4	4	5,3	4	3
Power Conversion	3	7	4	7	6	6	6
Balance of Plant	6	6	4	4	6	4	4
Safety	2	3	6	6	6	3	3
Licensing	1	3	3	3	3	2	2
Fuel Cycle	6	6	6	6	NA	NA	5
Safeguards	3	3	3	3	3	3	3
Overall TRL	2	3	3	5	5	3	3

Source: Argonne National Laboratory, Idaho National Laboratory, and Oak Ridge National Laboratory, "Advanced Demonstration and Test Reactor Options Study," 2017. Tables 2 and B-1.

原典: Gougar, Hans David, Idaho National Lab. (INL), Assessment of the Technical Maturity of Generation IV Concepts for Test or Demonstration Reactor Applications, Revision 2 (2015)

<https://www.osti.gov/biblio/1236803>

<http://www.osti.gov/servlets/purl/1236803/>

[参照例] 加政府の「SMRロードマップ」において示唆されるSMRの市場機会

...and an immense global SMR opportunity driven by climate change mitigation and energy security imperatives.

11

Replace coal-fired power generation



- SMRs can further transition the power sector away from coal
- Even in a 2-degree scenario IEA projects 1100GWe
- Potential market **over \$100B/year**

Remote island nations and off-grid communities



- Large potential in over 70k communities
- **\$30B/year market**



Heat & power for mines

- SMRs powering of new mines between now and 2040 could yield total global value of **\$3.5B/year market**



Steam for heavy industry

- Potentially **\$12B per year global market**. Joint project from Idaho NL and NREL identified 850 facilities where SMRs could provide steam for US heavy industry.

Bottom Line: Estimated global value of \$150B per year by 2040.

事業成立性評価の観点② 市場性

[参照例] SMRのビジネス・モデルを検討するための5つのステップ

1. Determine the requirements in terms of annual revenues

→ The project should cover its own costs and generate returns for its shareholders

2. Conduct a *market research*

→ Market size and needs

3. Analyze the *competitive landscape*

→ Strategic positioning

4. Conduct a *financial analysis* ..

.. on behalf of the *sponsor of the project*

5. Perform an *economic analysis* ..

.. from the point of view of *society*

What could make the project economically viable?

How the project should be structured to achieve its objectives?

What kind of support governments could provide?

. Dardour, Developing business models for SMR projects (March, 2019)

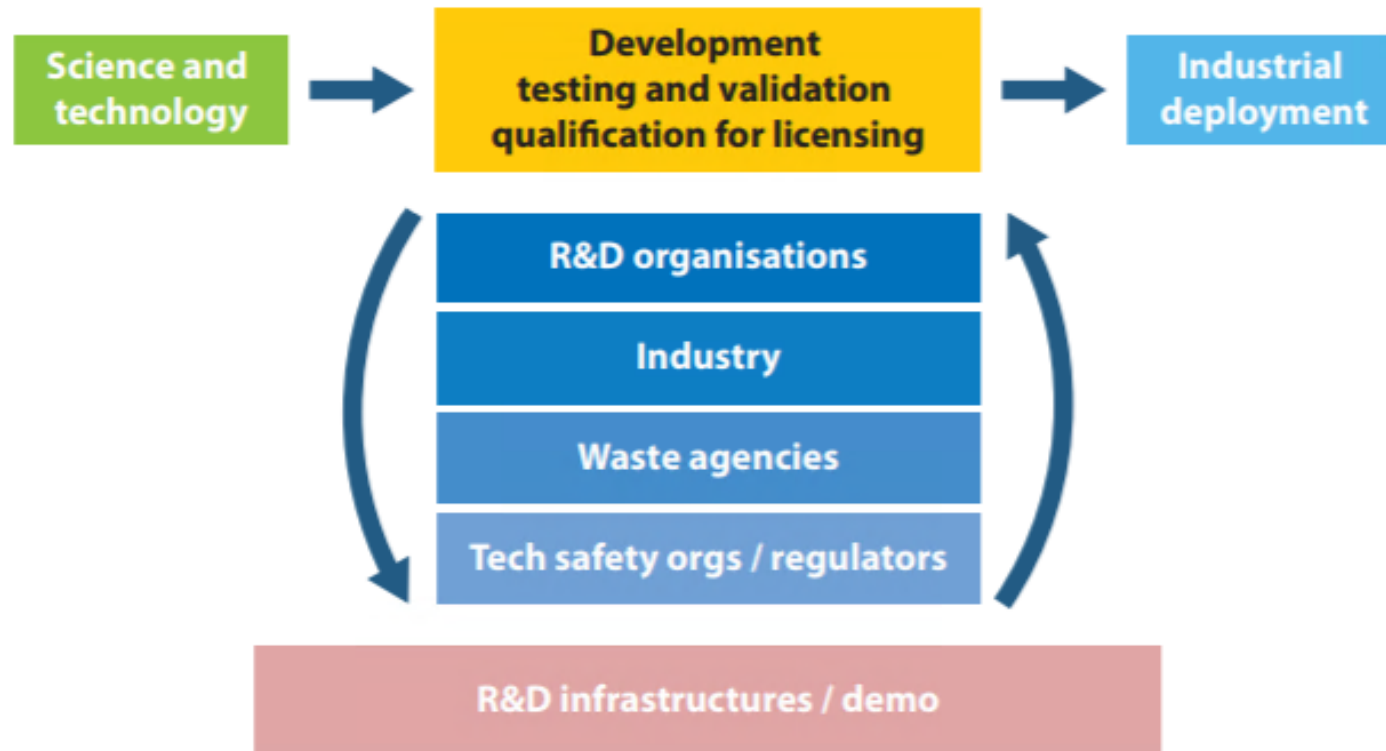
6

出典: SMR Deployment and Economics: Viability of Business, presented at IAEA-TWG on SMR (2nd meeting, July 8, 2019)
https://nucleus.iaea.org/sites/htgr-kb/twg-smr/Documents/TWG-2_2019/A04_20190708%20TWG%20SMR%20Deployment%20Van%20Heek%20.pdf

事業成立性評価の観点③ 開発体制

[参照例] OECD/NEA Nuclear Innovation 2050 (NI2050)における開発移行のイメージ

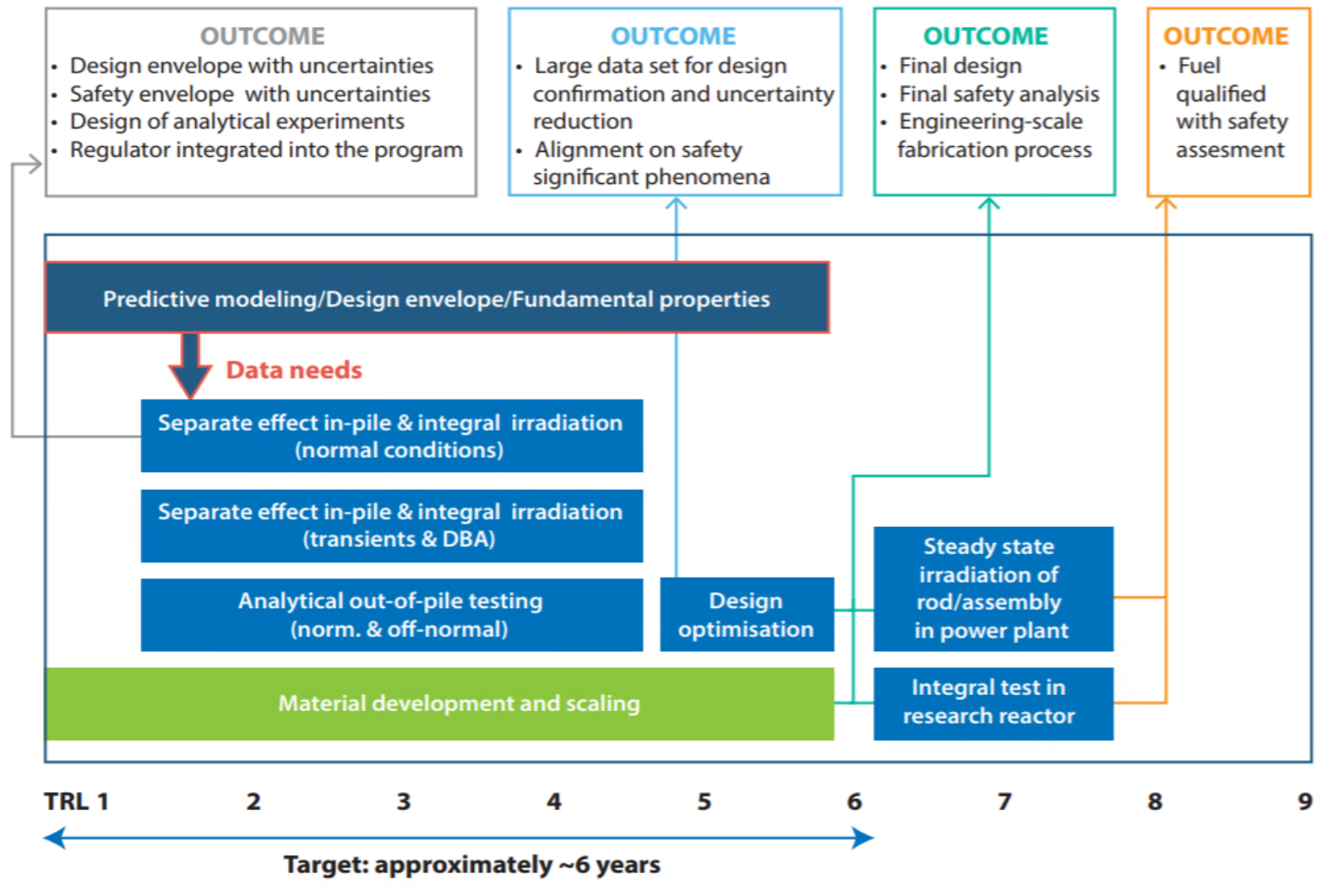
Figure 2: Going from science to market deployment: All stakeholders need to be on board



出典: OECD/NEA, Nuclear Innovation 2050 (NI2050) brochure, June 2019
<https://www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050-brochure.pdf>

事業成立性評価の観点③ 開発体制

[参照例] 新型燃料の開発・実用化の加速化に向けた新たなパラダイム（NI2050の一例）

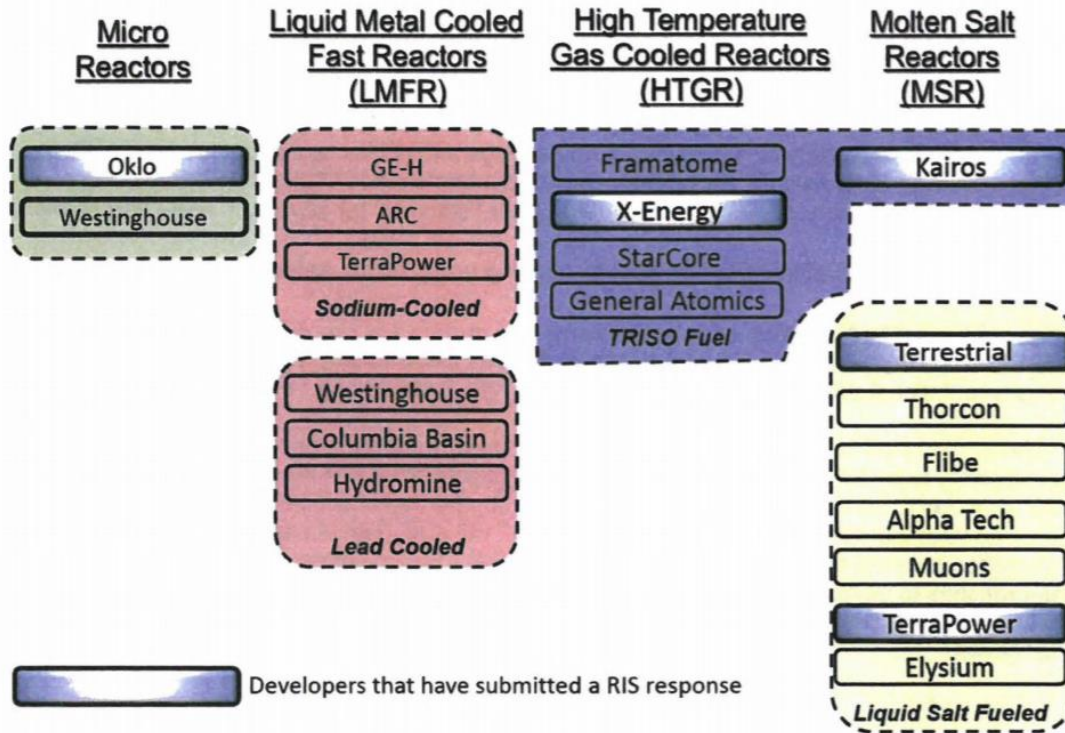


出典: OECD/NEA, Nuclear Innovation 2050 (NI2050) brochure, June 2019
<https://www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050-brochure.pdf>

事業成立性評価の観点④ 規制対応

[参照例] 米国における事業者主導の規制対応

- 1) 個別事業者によるPre-application Activities
- 2) Industry-Led Licensing Modernization Projectを通じた新しいアプローチの提案



NEI TECHNICAL REPORT 18-04

WORKING DRAFT

Modernization of Technical Requirements for Licensing of Advanced Non-Light Water Reactors

Risk-Informed Performance-Based Guidance for Non-Light Water Reactor Licensing Basis Development

Draft Report Revision N

September 28, 2018

© NEI 2018. All rights reserved.

Southern Company

Modernization of Technical Requirements for Licensing of Advanced Non-Light Water Reactors

High Temperature, Gas-Cooled Pebble Bed Reactor Licensing Modernization Project Demonstration

Project Report
Issued Final

Authors: Brandon Waites, Karl Fleming, Fred Silady, Alex Huning, and Jason Redd

Document Number
SC-29980-200 Rev 0

August 2018

Prepared for:
U.S. Department of Energy (DOE)
Office of Nuclear Energy
Under DOE Idaho Operations Office
Contract DE-AC07-05ID14517

Issued final by:

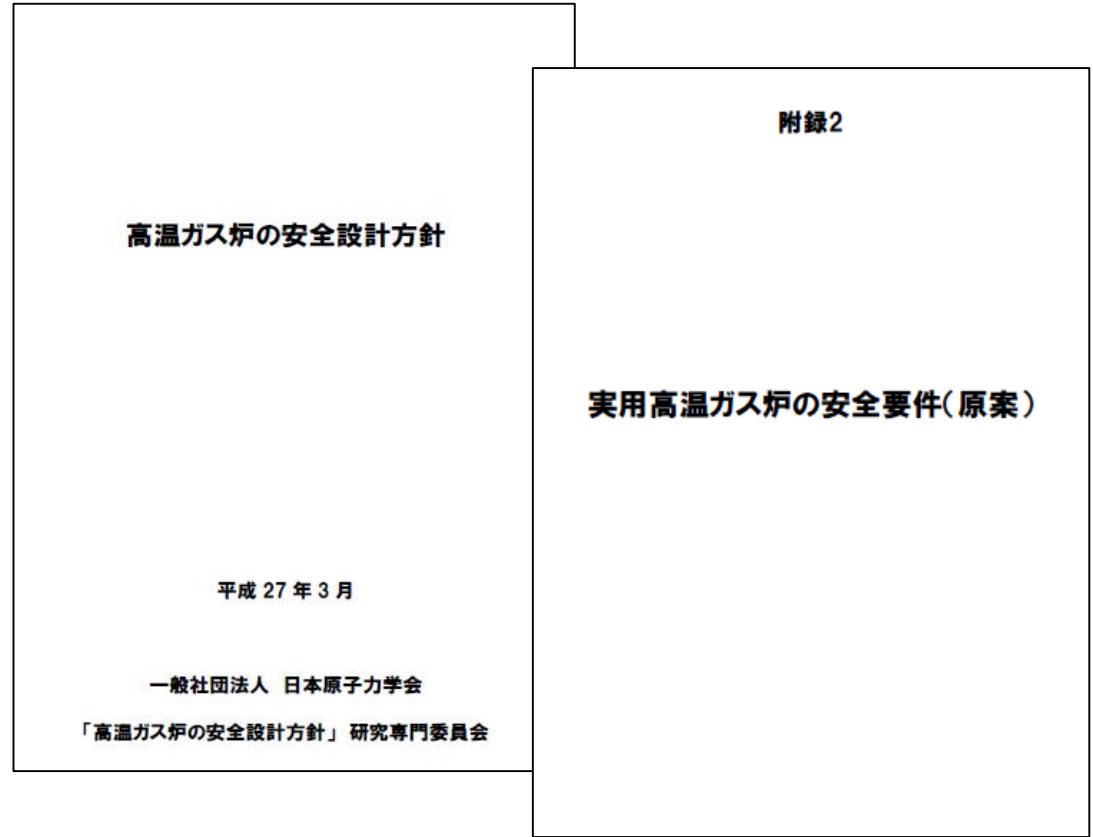
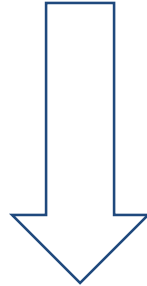
Amir Afzali 8/11/2018

Amir Afzali, Next Generation Licensing and Policy Director Date
Southern Company Services

事業成立性評価の観点④ 規制対応

[参照例] 高温ガス炉に関する安全要件

HTTRの開発・設計・運転に係る経験を踏まえ、**日本原子力学会**において、実用炉の安全設計方針・安全要件を検討し、その成果を国際的に提案。



Modular High Temperature Gas Cooled Reactor Safety Design

Closed for proposals

Project Type	Project Code	CRP	Approved Date	Status
Coordinated Research Project	I31026	2081	12/12/2013	3 - Active - Ongoing

Start Date	Expected End Date
12/12/2014	11/12/2018

Participating Countries

China Germany Indonesia Japan Kazakhstan Republic of Korea Ukraine
United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland United States of America

出典: IAEA

事業成立性評価の観点④ 規制対応

[参照例] 高温ガス炉の安全性に関する国際共同研究：LOFC（Loss of Forced Cooling）

炉心流量及び冷却喪失時の挙動を把握する試験を**海外諸国の規制支援機関・研究機関の参加を得て実施**。得られるデータ・知見をもとに、安全設計・基準の国際標準化を目指す。

目的

HTTRを用いた安全性実証試験である炉心流量喪失試験及び炉心冷却喪失試験に係る事業について、海外参加機関の資金も得て、OECD/NEA原子力施設安全委員会のプロジェクトとして推進する。

目標

我が国の高温ガス炉の安全基準が国際標準となるよう主導する。

協力の経緯

2009年 6月 HTTRを用いた試験をNEAプロジェクトに提案し、
専門家会合の設置が承認

2010年12月 HTTRにて、Run 1の試験を実施

2011年 6月 原子力機構がプロジェクト協定書に署名

HTTRの新規制基準への適合性審査のため試験延期

2021年 HTTRの運転再開後、Run 2及び 3を実施予定

協力の枠組み

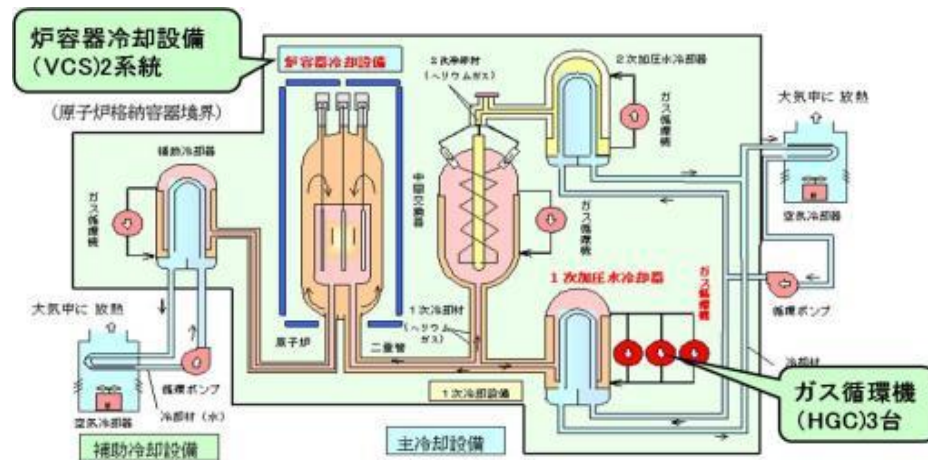
(参加国)

日本原子力研究開発機構（日本）、原子力規制委員会（米国）、原子力委員会及び放射線防護原子力安全研究所（仏国）、施設・原子炉安全協会（独国）、韓国原子力研究所（韓国）、チェコ原子力研究所（チェコ）、KFKI原子力研究所（ハンガリー）

出典：文部科学省資料をもとに原子力機構からの情報を加えて著者改訂

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/072/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2014/09/11/1351766_08.pdf

試験番号	原子炉出力	試験名称	試験内容	実施年
Run 1	9 MW	炉心流量喪失試験	循環機3台停止	2010
Run 2	30 MW			2021(予定)
Run 3	9MW	炉心冷却喪失試験	循環機3台停止 + VCS2系統停止	2021(予定)



事業成立性評価の観点④ 規制対応

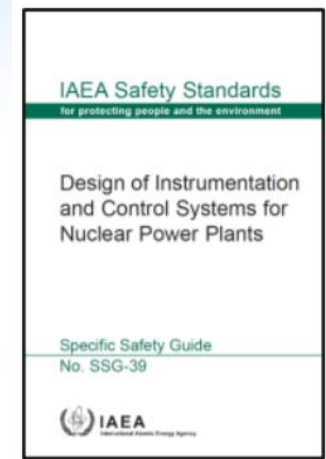
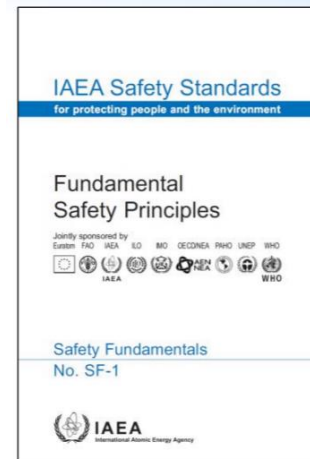
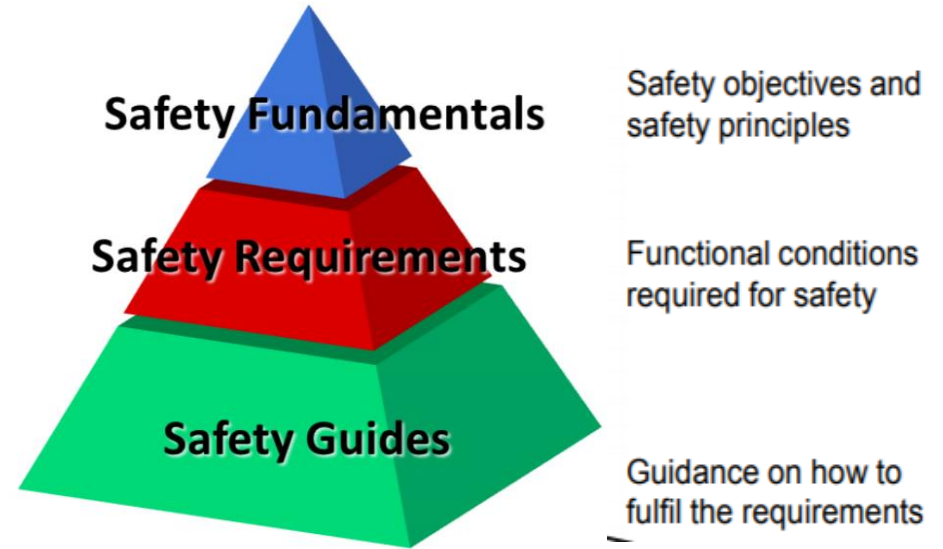
[参照例] IAEAの現行安全要件等のSMRへの適用性の検討

IAEAでは、SMR Regulator's Forumに加え、安全・セキュリティ局が中心となって、現行安全要件等のSMR・革新炉への適用性の検討に着手。

<現在検討が進められている課題例>

- IAEA安全要件文書SSR-2/1のSMRへの適用性に関するレビュー
- SMRの安全評価・解析に関する検討
- SMR導入にあたってのEPZのあり方に関する共同スタディ

なお、現時点では、提案されている炉型も多岐にわたることから、SMRに特化した安全要件に関する新たな文書を策定する予定は無い。



出典: IAEA資料をもとに著者作成

Cornelia Spitzer, IAEA, Nuclear Installation Safety: Priorities related to Small and Medium or Modular Reactors (SMRs)

https://nucleus.iaea.org/sites/htgr-kb/twg-smr/Documents/TWG-2_2019/C02_Spitzer_2nd%20TWG-SMR%20meeting%2007_2019.pdf

おわりに

- 民間の創意工夫を活かした原子力イノベーションを促進するため、METI、MEXTが連携し、JAEAの協力を得つつ、NEXIP事業に着手。
- 事業成立性の評価において、技術成熟度に加え、市場性、開発体制及び規制対応の観点を重視し、技術面に加え、プロセス面のイノベーションを後押し。
- 規制対応については、新たな技術・設計概念を提案する開発事業者がユーザー企業の参加を得ながら議論を主導することが期待され、高温ガス炉など革新炉の先行経験や海外動向が参考となり得る。

(例)

- ✓ 許認可申請に先立つ個別事業者による安全設計の検討・提示
- ✓ 許認可プロセスの合理化に向けた産業大の取組み（米国NEIの例）
- ✓ 日本原子力学会における安全要件の検討と国際提案（GEN-IV炉の先例）
- ✓ 規制関係機関の参加を得た国際共同研究を通じたデータ・知見の蓄積
- ✓ IAEA安全要件等の適用性の検討

ご静聴有り難うございました