



日本原子力学会 新型炉部会

部会・連絡会セッション

「高速炉戦略ロードマップ検討会報告」

座長：山口 彰（東京大学）

(1) 高速炉戦略ロードマップ検討会の検討範囲

笠原 直人（東京大学）

(2) 長期的視点からの検討：高速炉開発の意義

森 行秀（MFBR）

(3) 短期的視点からの検討：技術継承と東電福島
第一事故を踏まえた安全性向上

堺 公明（東海大学）

(4) 総合討論



日本原子力学会 新型炉部会
部会・連絡会セッション
「高速炉戦略ロードマップ検討会報告」

(1) 高速炉戦略ロードマップ検討
会の検討範囲

2018年9月6日

笠原 直人(東京大学)



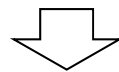
背景と目的

◆ 背景

- 東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「もんじゅ」廃止措置決定といった情勢の大きな変化により、高速炉開発戦略を練り直す必要性が出てきている。
- 高速炉開発会議の下、戦略ワーキンググループ(WG)では 今後10年程度の高速炉開発戦略ロードマップ構築の検討が実施されている。
- 原子力学会の新型炉部会は新型炉開発のロードマップ構築と関連する研究開発戦略の検討等を実施するために設立されている。

◆ 目的

- 今後 検討されるロードマップ[1]を補完する、高速炉サイクル開発の長期目標や人と社会との係りを含む技術戦略を中心に、長期的視点と短期的視点から学会としての見解を示す



高速炉戦略ロードマップ検討会

設置期間： 2017年8月～2018年12月

[1]原子力関係閣僚会議、「高速炉開発の方針」(2016年12月決定)



日本原子力学会 新型炉部会 「高速炉戦略ロードマップ検討会」

(敬称略・順不同)

笠原 直人(主査)	東京大学 大学院工学研究科	藤田 琢己	完全免震原子炉支持構造(株)
山野 秀将(幹事)	日本原子力研究開発機構	奥出 克洋	米国サウスウエスト研究所
堺 公明	東海大学 工学部	藪下 幸久	(株)シー・エス・エー・ジャパン
守田 幸路	九州大学 大学院工学研究院	尾崎 博	富士電機(株)
高木 直行	東京都市大学 工学部	内藤 俣孝	(株)ナイス
関本 博	元 東京工業大学	糸岡 聡	日立GEニュークリア・エナジー(株)
望月 弘保	東京工業大学科学技術創成研究院	浅野 和仁	(株)東芝
van Rooijen, Willem F. G.	福井大学附属国際原子力工学研究所	田口 正樹	三菱電機(株)
宮崎 慶次	元 大阪大学	黒目 和也	三菱重工業(株)
杉山 憲一郎	元 北海道大学	伊藤 隆哉	三菱FBRシステムズ(株)
中江 延男	元 日本原子力研究開発機構	森 行秀	三菱FBRシステムズ(株)
小竹 庄司	日本原子力発電(株)	大谷 知未	三菱FBRシステムズ(株)
宮川 高行	日本原子力発電(株)	市川 健太	三菱FBRシステムズ(株)
大本 正人	関西電力(株)	永田 敬	三菱FBRシステムズ(株)
後藤 正治	東京電力ホールディングス(株)	須田 和則	日本原子力研究開発機構
松井 一秋	(一財)エネルギー総合工学研究所	江沼 康弘	日本原子力研究開発機構
尾形 孝成	(一財)電力中央研究所	大島 宏之	日本原子力研究開発機構
太田 宏一	(一財)電力中央研究所	高田 孝	日本原子力研究開発機構
		大木 繁夫	日本原子力研究開発機構

計37名



開催実績と計画

	2017年度							2018年度							
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~12
検討会		▲ (9/11) 第1回	▲ (10/16) 第2回	▲ (11/20) 第3回	▲ (12/27) 第4回		▲ (2/27) 第5回			▲ (5/9) 第6回		▲▲ (7/5) 第7回 (7/11) 第8回	▲ (8/22) 第9回	△ (9/20) 第10回	
もんじゅ活用WG									▲ (4/11) 第1回	▲ (5/18) 第2回	▲ (6/28) 第3回				
その他 (外部報告等)	(8/22)▲ 運営委員会にて検討会設置承認	▲(9/13-15) 学会秋設置報告						▲(3/26-28) 学会全体会議にて報告 プレスリリース						△(9/6) 学会秋企画セッション	△ 報告書と資料集web公開 プレスリリース 解説記事

検討会				
第1回:2017/9/11 ・趣旨確認 ・検討会の進め方 ・ロードマップ検討法 ・高速炉サイクル技術開発の意義	第2回:2017/10/16 ・高速炉開発の目標と導入シナリオの検討 ・検討会報告書骨子案の検討	第3回:2017/11/20 ・高速炉開発の目標と導入シナリオの検討 ・論点整理 ・高速炉開発状況 ・検討会報告書骨子案の検討	第4回:2017/12/27 ・論点整理 ・検討会報告書骨子案の検討 ・技術の俯瞰マップの検討	第5回:2018/2/27 ・検討会報告書ドラフトのレビュー ・プレスリリース文書のレビュー ・技術の俯瞰マップの検討
第6回:2018/5/9 ・検討会報告書の見直し検討 ・技術の俯瞰マップの検討 ・検討会報告書資料集の執筆分担	第7回:2018/7/5 ・検討会報告書の見直し検討	第8回:2018/7/11 ・検討会報告書のレビュー	第9回:2018/8/22 ・企画セッション資料のレビュー	第10回:2018/9/20 ・検討会報告書のレビュー ・検討会報告書資料集のレビュー ・プレスリリース文書のレビュー



日本原子力学会 新型炉部会 「高速炉戦略ロードマップ検討会」

「廃止措置期間中『もんじゅ』活用検討ワーキンググループ」

笠原 直人(主査)	東京大学	尾崎 博	富士電機(株)
宮崎 慶次	大阪大学(名誉教授)	古賀 和浩	富士電機(株)
杉山 憲一郎	北海道大学(名誉教授)	本岡 直人	三菱重工業(株)
竹田 敏一	福井大学	菊池 裕彦	三菱重工業(株)
岡村 茂樹	富山県立大学	小野 正博	日立GEニュークリア・エナジー(株)
小竹 庄司	日本原子力発電(株)	森泉 真	日立GEニュークリア・エナジー(株)
伊藤 隆哉	三菱FBRシステムズ(株)	神保 昇	東芝エネルギーシステムズ(株)
竹内 則彦	日本原子力研究開発機構	久保田健一	東芝エネルギーシステムズ(株)
江沼 康弘	日本原子力研究開発機構		
山野 秀将	日本原子力研究開発機構		

(敬称略・順不同)

計10名

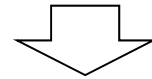
メーカー協力者 計8名

	2017年度						2018年度								
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~12
もんじゅ活用WG									▲(4/11) 第1回	▲(5/18) 第2回	▲(6/28) 第3回				
その他 (外部報告等)							▲(2/27) 戦略RM検討会にて WG設置承認					▲(7/5) 第7回RM検討 会で報告			
第1回:2018/4/11 ・趣旨確認 ・WGの進め方 ・もんじゅ側検討状況		第2回:2018/5/18 ・関西・中京圏大学での検討 ・ナトリウム技術維持の必要性 ・廃止措置期間中のもんじゅ活用の検討						第3回:2018/7/ ・廃止措置期間中のもんじゅ 活用の検討 ・検討結果のまとめ							

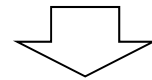


日本原子力学会 新型炉部会 「高速炉戦略ロードマップ検討会報告」

(1) 高速炉戦略ロードマップ検討会の検討範囲



- a) 検討の基本方針
- b) 検討範囲
- c) 技術戦略の視点



(2) 長期的視点からの検討：
高速炉開発の意義

(3) 短期的視点からの検討：
技術継承と東電福島第一事
故を踏まえた安全性向上



検討の基本方針

- 新型炉部会：高速炉の研究開発に係る大学、研究機関、メーカ、電力の職員、OBが多く参加
- 自由な討議を通して、多様な議論の中から本質的な部分を抽出・展開
- 高速炉開発の意義と開発の方向性について、国民が理解し易い形で提示
- 技術戦略は、世の中がそれをどのように理解するかを考え、国民に支持が得られる論理（Logic）とそれを支える事実認識（Fact Finding）が必要
- 以上から、範囲を技術から人や社会まで広げ、以下の（1）から（6）について検討した。

- （1）高速炉サイクル開発の意義
- （2）高速炉サイクル開発の特徴
- （3）我が国の高速炉開発の歴史と現状
- （4）海外の高速炉開発の状況
- （5）長期開発における不確実性とその対応策
- （6）失敗や事故の経験を活かすマネジメント

- 上記の検討に基づき、技術戦略の視点を提示する。



検討範囲

(1) 高速炉サイクル開発の意義

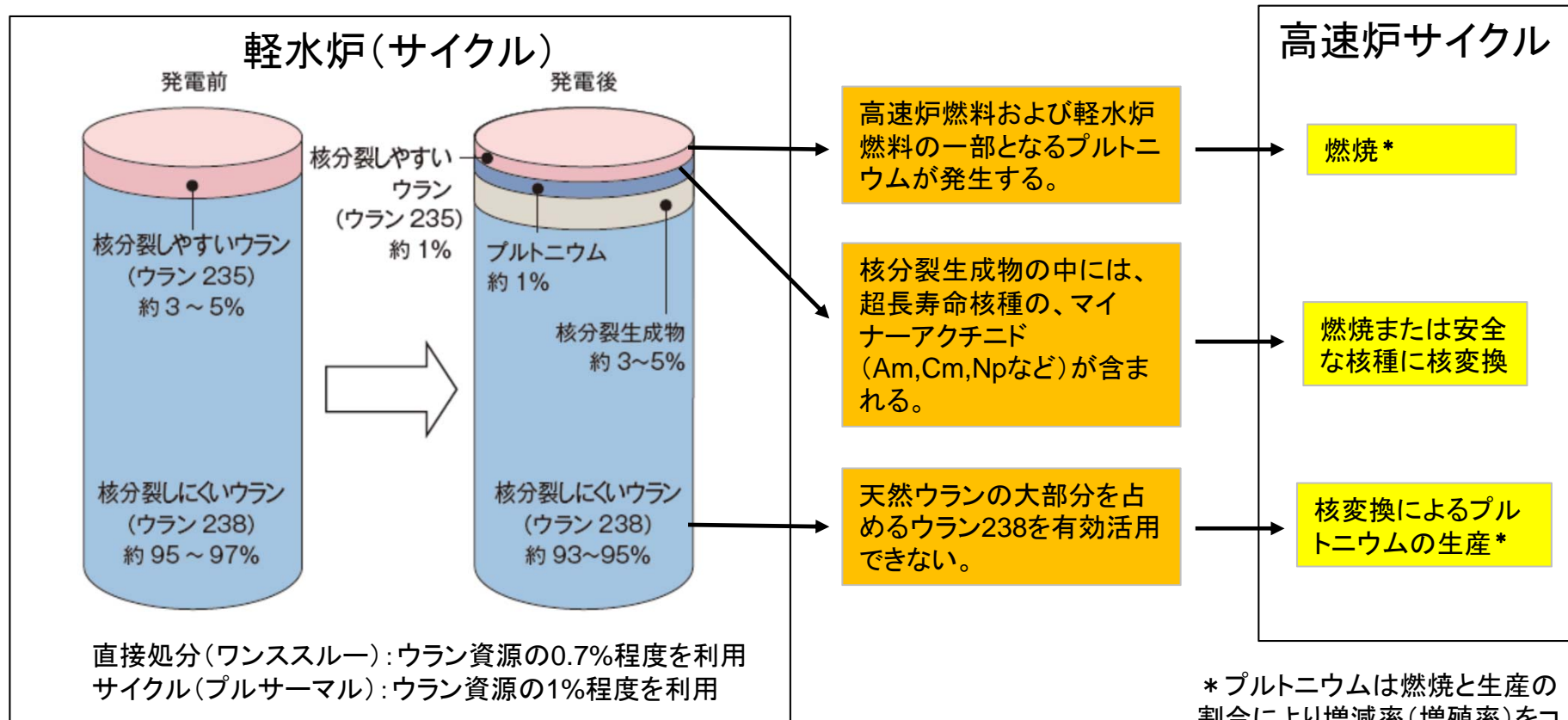
- ウラン資源を無駄なく利用し、持続的な利用を可能とする高速炉サイクルの有用性は、原子力開発の黎明期、1950年代から認識されていた。エネルギー資源の乏しい我が国では、エネルギー安全保障の観点から、1960年代よりから一貫して高速炉サイクル開発を国策として進めてきている。
- 近年では、高レベル放射性廃棄物の最終処分の問題が原子力利用を継続するための社会問題となっている。高速炉は、軽水炉では燃焼し難いネプツニウム、アメリシウム、キュリウムといった超長寿命の核種(マイナーアクチノイド:MA)を核変換または燃焼させることができる。
- 世界は脱炭素社会を目指すことで合意されている。我が国もCO₂を排出しないベース電源として原子力エネルギーを利用していく方針である[2]。原子力の利用に際して、安全性の確保を大前提に、ウラン資源の利用の大幅な拡大によって長期に亘りエネルギーを安定供給(以下、「**資源有効利用**」と呼ぶ)し、高レベル放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減(以下、「**環境負荷低減**」と呼ぶ)を達成できる技術であることから、高速炉の開発意義は今も変わることはない。

[2] 経済産業省、第5次エネルギー基本計画(案)(2018)



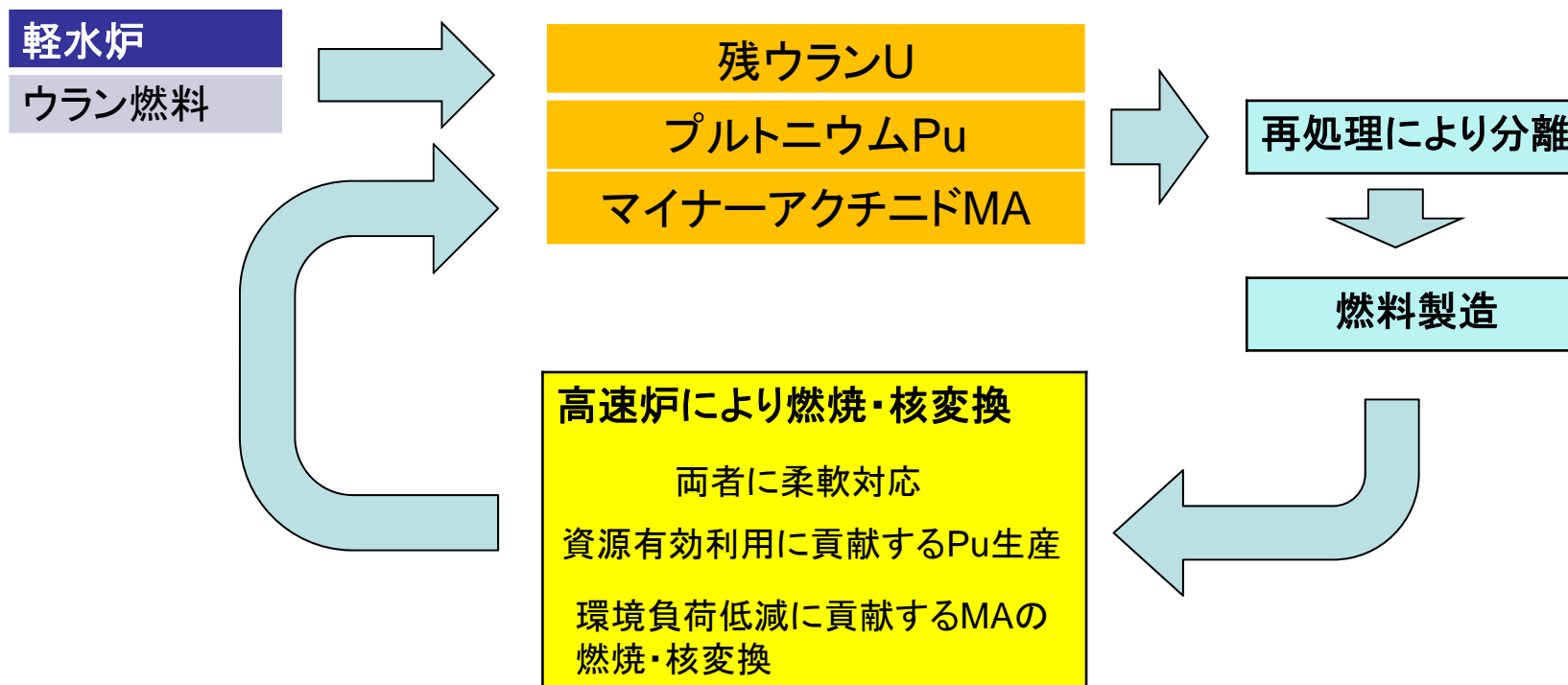
高速炉サイクル開発の意義

高速炉サイクルは、ウラン資源の1%程度しか利用できない軽水炉サイクル(プルサーマル)の課題を補い、「資源有効利用」に貢献するウラン238からプルトニウムへの核変換と、「環境負荷低減」に寄与する超長寿命核種(マイナーアクチニド)の燃焼・核変換を、同時に達成できる概念である。





高速炉サイクルの概念



難易度と効果

直接処分(ワンスルー): 易 放射性物質寿命10万年程度*

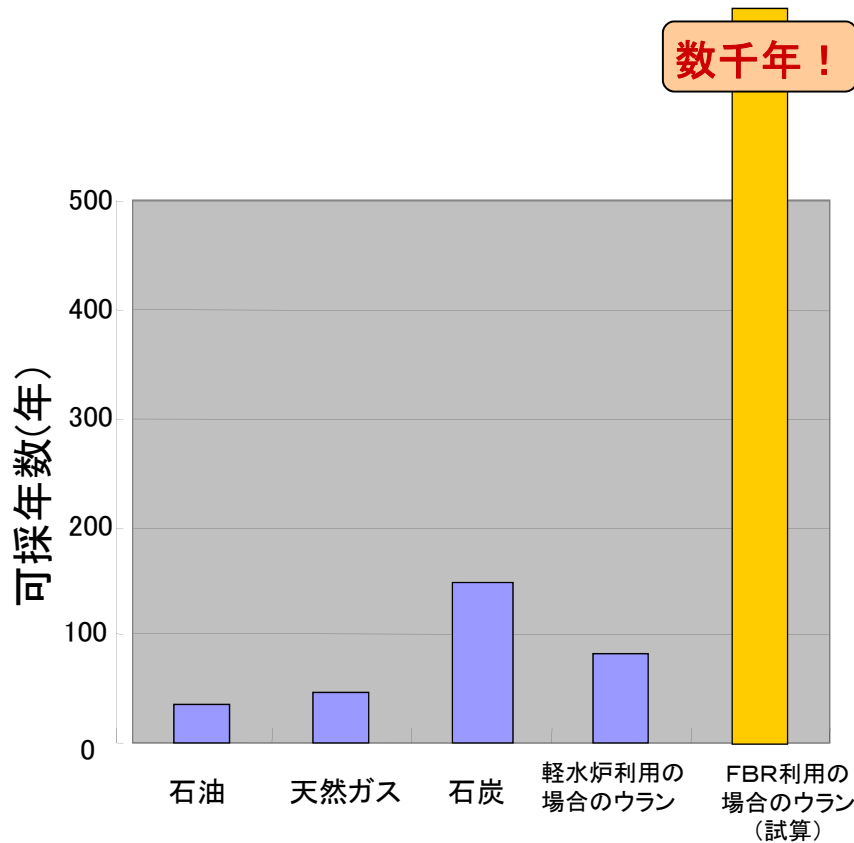
U+Puのリサイクル: 中 燃料増殖+放射性物質寿命8千年程度に短縮*

U+Pu+MAのリサイクル: 難 燃料増殖+放射性物質寿命3百年程度に短縮*

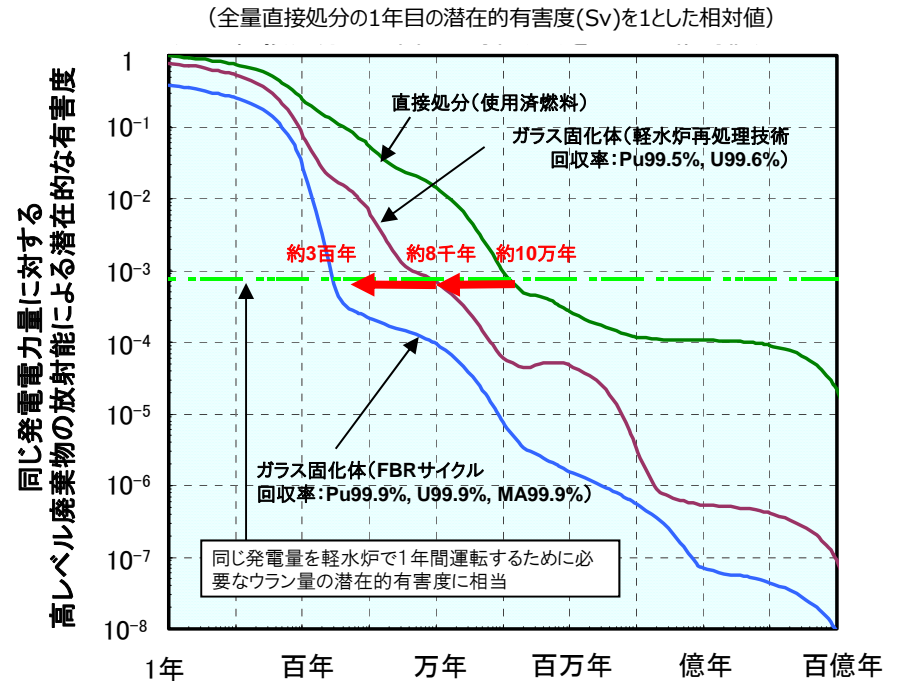
* 放射線の人体への影響が天然ウランと同等に減衰するまでの期間



資源有効利用と環境負荷低減への貢献



ウラン資源有効利用によるエネルギー安全保障貢献



高レベル廃棄物の潜在的有害度の低減効果

JAEA 次世代高速炉サイクル研究開発センター提供



検討範囲

(2) 高速炉サイクル開発の特徴

- 高速炉サイクルの開発を含めどんな技術でも、新技術の開発には失敗を繰り返しながらの試行錯誤が必然。原子炉の場合、万一重大事故が起きた場合は被害規模が大きいことから、大きな失敗は許容不可。
- このため特に慎重に進める必要があり、実験炉、原型炉、実証炉、商用炉と段階を踏んで開発。よって、その**実用化には、技術者の現役寿命を超える数十年単位の開発期間**が必要[3]。
- 軽水炉でのプルサーマル利用との共用等、効率的な開発が重要。



原型炉「もんじゅ」は経験を積むための研究開発段階炉であり、目的の一つは失敗を含む経験の蓄積である。

[3] 原子力教科書「高速炉システム設計」オーム社(2014)



検討範囲

(3) 我が国の高速炉開発の歴史と現状

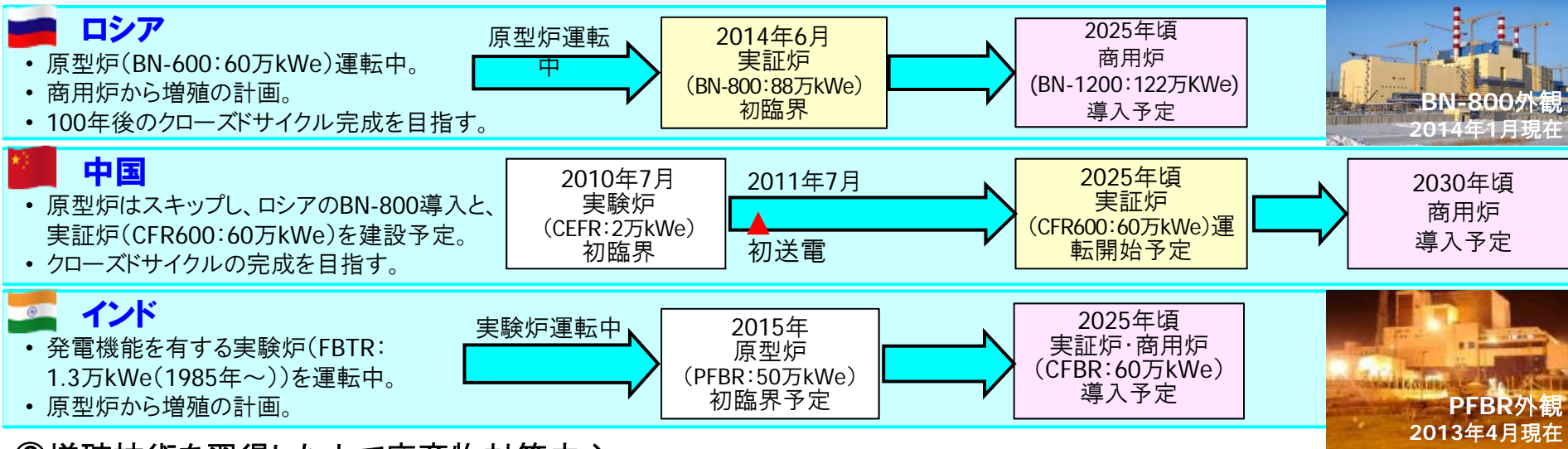
- エネルギー資源の乏しい我が国では、エネルギー安全保障の観点から、1960年代から一貫して高速炉サイクル開発を国策として進めてきており、1977年に実験炉「常陽」が1994年に原型炉「もんじゅ」が臨界に達した。
- 「もんじゅ」は1995年に2次冷却系配管でナトリウム漏えい事故を起こしてから長期間運転停止状態が続いていた。そして、政府は2016年長期間停止状態にあった「もんじゅ」の廃炉を決定した。
- 近年は、ナトリウム冷却高速炉(MOX燃料)、軽水炉再処理技術を発展させた高速炉用の再処理技術および燃料製造法の2050年頃の実用化を目指した「高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)プロジェクト」が実施されてきた。
- 「もんじゅ」は、設計・建設・試運転の段階までの技術や知見は蓄積されたが、**運転データや運転経験についてはほとんど得られていない**。特に、「常陽」の運転では得ることのできない蒸気発生器(SG)を含む水-蒸気系の運転データを「もんじゅ」で得ることの意義は大きい**が結局蓄積することができなかった**。
- 「もんじゅ」に対する新規制基準の適用に際しては、本来、軽水炉と異なる高速炉の仕様、および商用炉と異なる試験研究炉の特徴を考慮した基準を新たに策定すべきであったのに対し、原子力規制委員会は時間的制約の中で、**商用軽水炉基準と同時期に、その大部分を流用する形で高速炉用基準を策定した**。



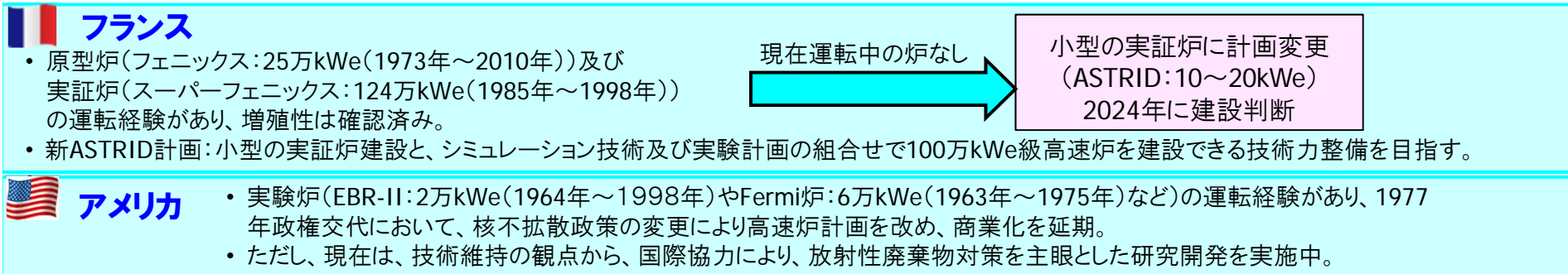
検討範囲

(4) 海外の高速炉開発の状況

① エネルギーセキュリティの観点から増殖を志向



② 増殖技術を習得した上で廃棄物対策中心



※イギリスは、実験炉・原型炉の運転経験あり。一方で、北海油田の発見もあり、高速炉計画中止。
 ドイツは、実験炉の運転経験あり。一方、原型炉は建設中に政策議論や財政難のため中止。
 ロシアは、鉛冷却高速炉等についても開発中。

日本原子力研究開発機構殿資料



検討範囲

(5) 長期開発における不確実性とその対応策

- 長期開発に対しては、当初のニーズが陳腐化して役に立たなくなるリスク等が指摘されている。人材を確保し技術を維持していくには、意義を国民に理解してもらう継続努力が必要。
- 現時点では、**ナトリウム冷却高速炉がもっとも実現性が高い**技術体系と評価している専門家は多い。しかし、長期的開発期間を考慮すると、現在の主流であるナトリウム冷却以外の可能性も否定できず、国際的開発動向を踏まえた計画の定期的な見直しができる仕組みが必要。
- 以上より、高速炉サイクル技術の実現に向けては、50年以上に亘る長期の開発計画を具体化し、必要なリソースの確保および効果的な配分が重要となる。
- **技術の多様性を確保**することも重要である。このためには、大学や民間の積極的な活用が有効であると考えられる。
- また、適当な期間毎に社会情勢の変化、国内外の開発動向等を考慮して、開発の進め方を見直すことができるホールドポイントを設けることが必要であると考えられる。



検討範囲

(6) 失敗や事故の経験を活かすマネジメント

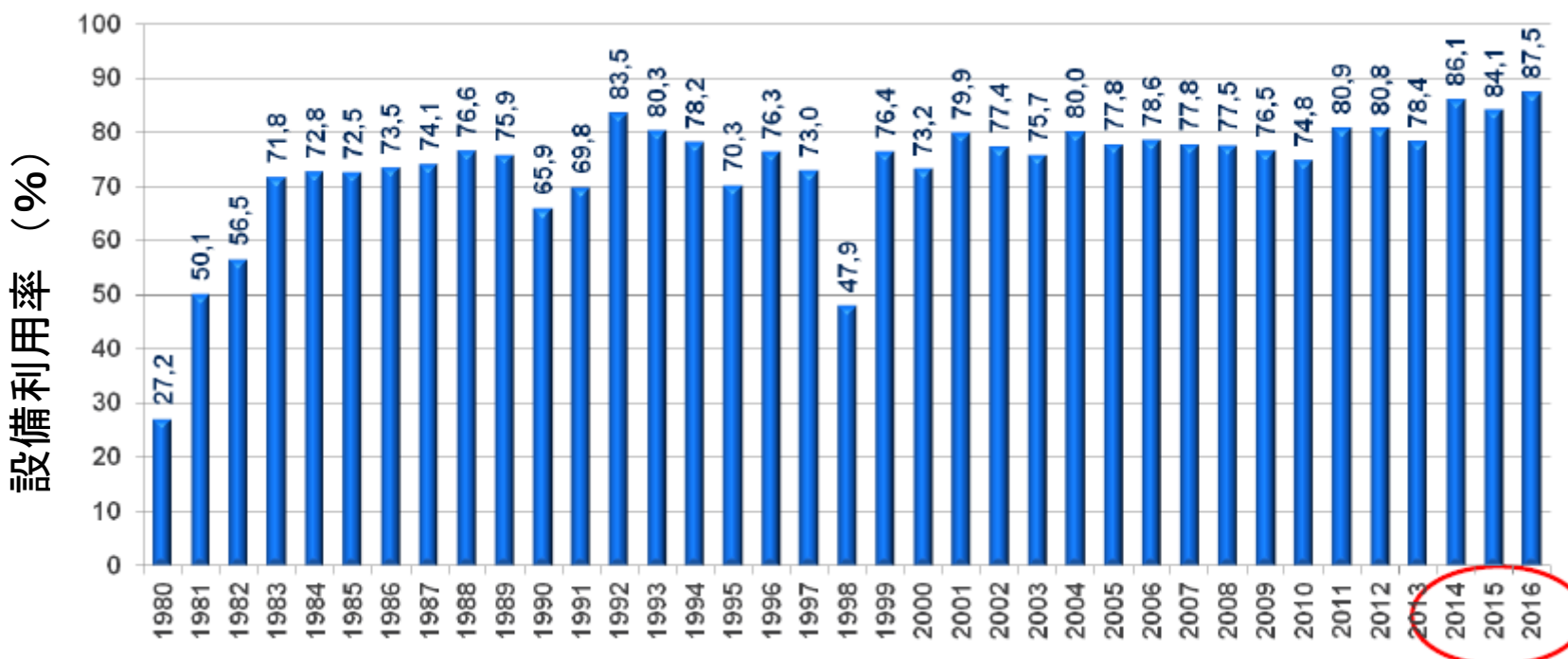
- 高速炉サイクル技術のような新技術開発は、開発中の失敗やトラブル、事故は避けられず、それらのリスクに対するマネジメント(リスクマネジメント)を徹底する必要がある。
- ナトリウム漏えい 事故の場合、日本では「もんじゅ」におけるナトリウム漏えいに対するマネジメントに失敗し長期運転停止を招いた。一方、ロシアやフランスは20回以上のナトリウム漏えいを経験しながらも、その経験を技術開発に活かしている。
- 安全神話などの誤解や、絶対安全か非安全かといった二項対立による不合理な判断がなされることが無いようにも注意が必要である。「もんじゅ」が長期間停止した要因の一つに、ナトリウム漏えいは起こり得ないとの誤解を与える説明をしたことと、事故後もそうした誤解を解く努力をしてこなかったことが挙げられる。
- これからは、絶対安全のような安易な説明ではなく、どんなに努力しても**トラブルや事故が起る可能性はゼロで無い**ことを伝えた上で、仮に漏えいなどの事故が発生した場合でも、その影響が炉心などの**安全性に影響を及ぼさない緩和対策**が講じられていること、さらに安全性を向上させる**努力を継続**していくことを正しく説明すべきである。
- また、軽水炉と高速炉では、炉心損傷事故につながる要因と、事故時の影響緩和策が異なることから、それを考慮した対策や規制が合理的であることを、ねばり強く説明していく必要がある。



高速炉 BN-600の運転実績

- 2017年4月8日に、電力グリッドへの初併入(1980年4月8日)から37周年を達成。
- BN-600の商業運転開始以降の平均設備利用率(1982年～2016年):75.55%
2014年から2016年までの平均設備利用率は85.9%。
- 2016年には、過去最高の稼働率87.5%を記録。

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{年間発電量(kWh/年)}}{\text{定格発電出力(kW)} \times 365 \text{日} \times 24 \text{時間}}$$



出典: Yu.V. Nosov, et al., "USSR and Russian fast reactor operation through the example of the BN600 reactor operating experience and peculiarities of the new generation BN800 reactor power unit commissioning," IAEA-CN245-553, FR17 (2017)



技術戦略の視点

上記検討範囲の(1)のように高速炉サイクル開発の意義は大きいですが、(2)のように開発期間は長期になる。これに対して(3)～(5)で述べた現在の情勢や不確定性があり、(6)のような新しいマネジメントも求められていることから、従来のような単調なステップアップによる計画では、長期開発は困難が予想される。

このため、現状の情勢や目先の利益からは一定の距離を置いて100年程度は揺らがない普遍的な目標を定め、そこからバックキャストで長期計画を考えることとする。

次に現実的な視点から、長期計画との整合性を前提とした上、現在の情勢から出発してフォアキャストで短期計画を検討することとする。このような**長期と短期の2つの視点**を設けることで、長期に亘る**一貫性と不確実性に対する柔軟性**の両者を確保する方針とする。