

日本原子力学会 新型炉部会 企画セッション

(2) 我が国における ナトリウム冷却高速炉の研究開発及び国際協力

2022年3月16日

三菱FBRシステムズ(株)

小林 茂 樹

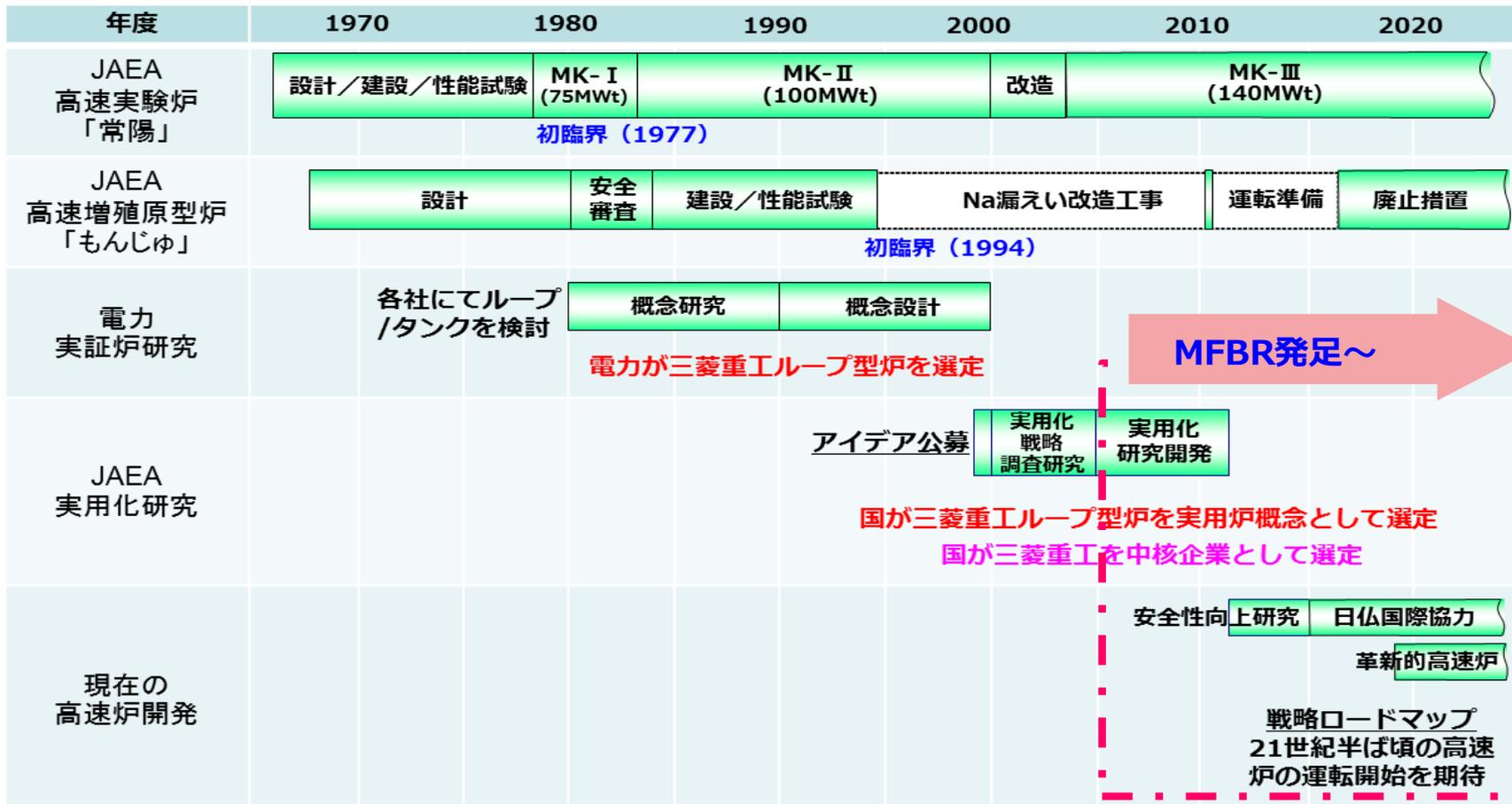
 三菱FBRシステムズ

1. 我が国の開発経緯
2. MFBR設立、研究開発体制
3. 高速炉開発の現況
(FaCT～安全性向上、タンク型炉、国際協力)
4. 高速炉開発の今後に向けて
5. まとめ

1. 我が国の開発経緯

我が国の開発経緯 – 常陽/もんじゅから、次期炉へ –

- **実用化研究(FaCT)** : JAEA/MFBR /三菱重工 (中核企業) が推進
- FaCT(ループ型炉)をベースに、**安全性向上(SDC/SDG)研究**へ
 - ⇒ GIFにおけるSDC/SDGの議論へ展開
 - ⇒ さらに、**日仏協力(仏国ASTRID炉(タンク型炉)開発、R&D協力)**へも進展
- **戦略ロードマップ(2018)** : 21C半ば頃「現実的スケールの炉」運転を期待



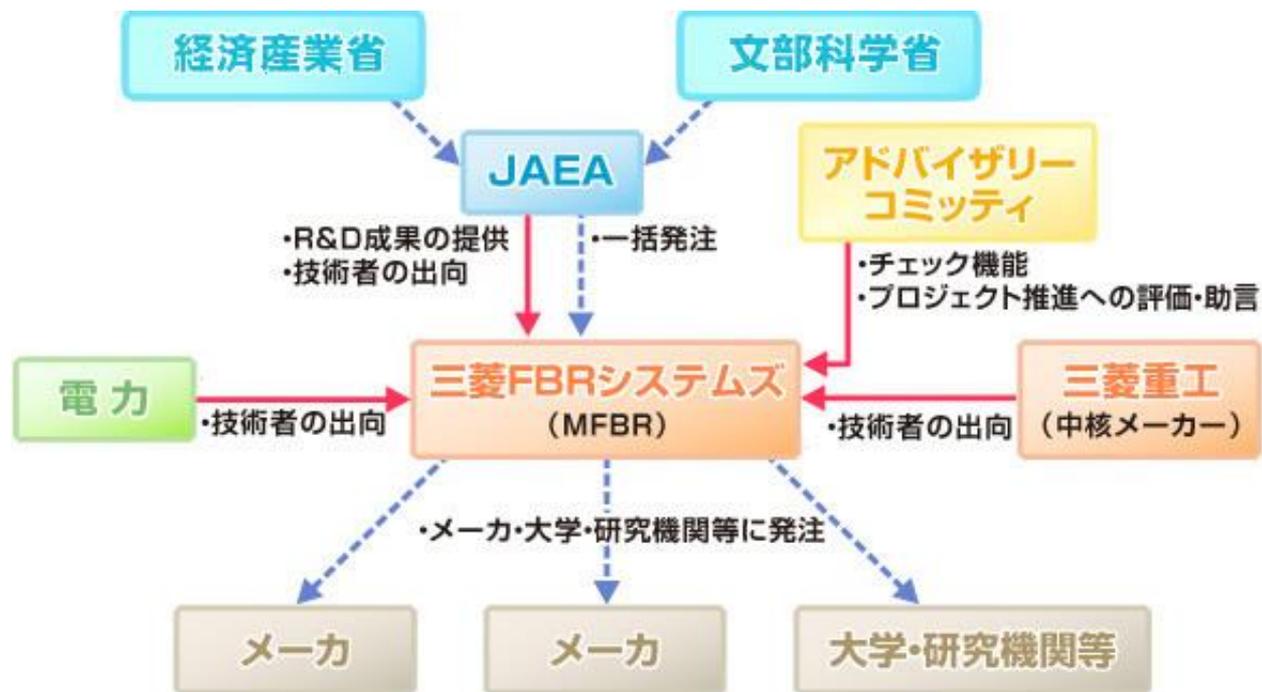
* 出典 : 三菱重工技報 Vol.57 No.4(2020)高速炉開発への取り組み

2. MFBR設立、研究開発体制

MFBRの設立経緯と研究開発体制

- ◆ 2006.12 : 「高速増殖炉サイクル実証プロセスの円滑移行に関する五者協議会」
 - ・ナトリウム冷却高速増殖炉の研究開発体制に係る方針：明確な責任体制の下で効率的にFBR開発実施のため、**中核会社1社に責任と権限及びエンジニアリング機能を集中**
- ◆ 2007.4公募：文科省、経産省、電事連及びJAEAが、**中核会社として三菱重工を選定**
 - ⇒三菱重工(MHI)は、FBR開発(設計、エンジニアリング)を専業とする新法人「**三菱FBRシステムズ(MFBR)**」を設立、同年7月1日より事業開始、FaCT研究等を推進

研究開発体制



3. 高速炉開発の現況

- (1) FaCT研究、安全性向上(SDC/SDG)研究
- (2) タンク型炉の検討
- (3) 実用化に向けた研究開発
- (4) 国際協力

開発現況(1) – FaCT研究、安全性向上(SDC/SDG)研究 –

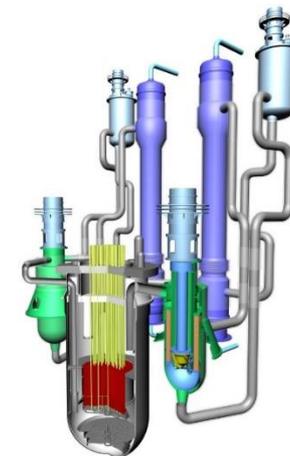
▶ 2007-10 : 「高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT)フェーズ I」

- ・実証施設の概念設計(FaCTフェーズ II)に向け、
Na冷却高速炉(SFR)ループ型炉(JSFR)概念を構築(右図)

▶ 2011- : 「安全性向上(SDC/SDG)研究」

- ・第4世代炉国際フォーラム(GIF)が、第4世代SFRの安全要件の世界標準化を進めるため、安全設計クライテリア(SDC)と、その解釈・解説に相当する設計ガイドライン(SDG)の構築を表明(2010.10) (次頁)

⇒我が国主導でSDC/SDGを構築すべく、JSFR概念を題材に、安全性向上に資する検討を施し、GIFにてSDC/SDG具体化の議論を展開



	2007-10	2011-12	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
国内開発	ループ型炉 (JSFR)											
	FaCT	安全性向上(SDC/SDG)	GIFでの議論等を展開中									
国際協力 (日仏)					国内適用性(主に耐震検討)						プラント概念検討	
					日仏協力 (ASTRID開発)						日仏協力 (設計/R&D)	

◆ FaCT : Fast Reactor Cycle Technology Development Project

➤ 「高速増殖炉サイクル技術の今後10年程度の間における研究開発に関する基本方針」(2006.12原子力委)を受け、文科省、経産省が開始 (実証炉の2025年頃までの実現、2050年前の実用炉の導入)

➤ 開発目標

・2050年頃の本格導入に向け、次世代の軽水炉に対し競争力のあるFBRサイクルの構築

① 安全性及び信頼性

② 持続可能性

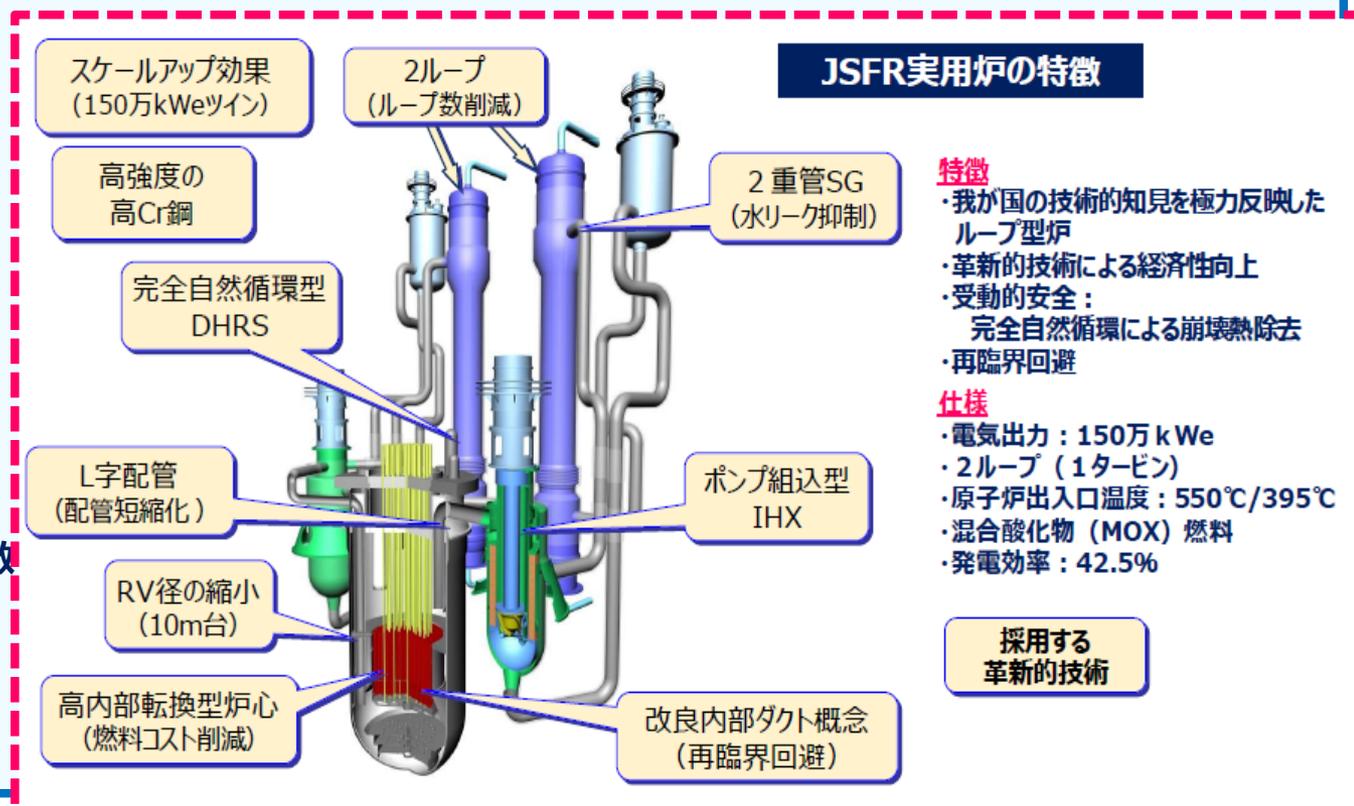
- ・環境保全
- ・廃棄物管理
- ・資源有効利用

③ 経済性

④ 核不拡散性

➤ 設計要求

- ・次世代軽水炉と同等の安全性・信頼性 (炉心損傷(再臨界)回避)
- ・発電原価：軽水炉等に匹敵 (建設工期、プラント寿命、設備利用率)
- ・軽水炉と同等の運転・保守・補修性



◆SDC/SDG構築(=安全性向上)に向けた、国内準備の方針

★日本が、SDC(GIF安全原則の要件化)、SDG(安全アプローチSDG(上位)と系統別SDG(下位))各素案を作成

– 既存のIAEA軽水炉向け安全関連図書類を活用し、SFRに必要な要件(炉心反応度特性、Na冷却材の自然循環能力、Na燃焼対策等に係る事項等)の付加

– 福一事故の教訓を踏まえ、設計基準を超える事象「設計拡張状態(DEC)」を踏まえた安全要件の充実

◆GIFへ日本案提示、国際レビューの実施

1) JAEA内の検討にMFBRが参加し、SDC及びSDGの素案を作成

2) 日本原子力学会に「特別専門委員会」を設置し有識者レビュー

・第4世代SFRのSDC特別専門委員会(2011-12)/SDG特別専門委員会(2013-17)

3) GIFへ日本案を提示(SDC(2013)、SDG(2016))

4) 更に国際規制機関等によるレビューを実施中

・SFR開発国の規制機関(米仏中露韓国欧日)

・IAEA(安全局/原子力局)、IAEA国際ワークショップ(独印等参加)

・OECD/NEA

・国際会議(FR17)

◆SDCの現状

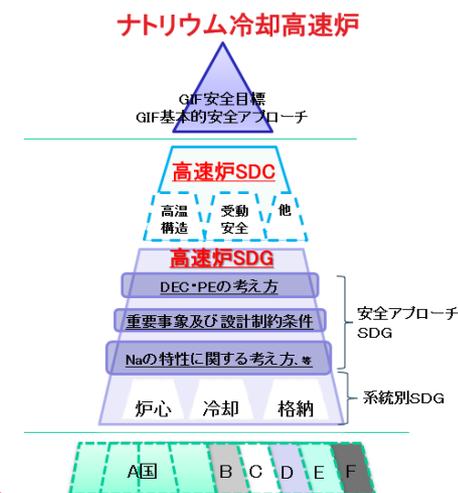
・2018.5 国際レビュー結果を反映した改訂版を、GIFが承認の上、Web公開

◆SDGの現状

・安全アプローチSDG(DEC考え方、重要事象/設計制約条件等) :

・2019.8国際機関レビュー結果を反映した改訂版を、GIFが承認の上、Web公開

・系統別SDG(炉心、冷却、格納) : 2019.1 国際機関レビュー開始、現在継続中



開発現況(1) – SFRの技術成熟度(TRL)について –

◆ SFRシステムは、常陽、もんじゅ、FaCT/安全性向上研究等を経た現状、実用化に必要な技術課題の多くは「TRL5」以上、実機設計に適用可能な「TRL7」以上の技術も複数保有

⇒ 技術の実証段階にあるか、技術の実証に進むことが可能な段階にある(下図参照)

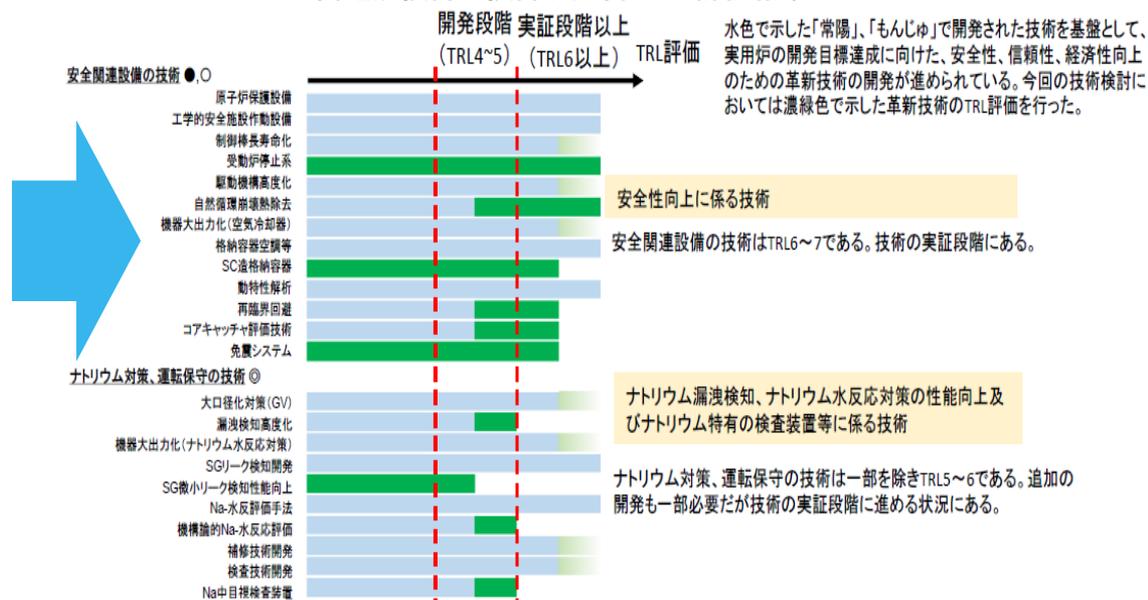
◆ GIFでの「開発時間の評価」においても、SFRの実証段階は、他炉型に比べ「早い」と評価されており、安全設計に関する指針整備も、SFRが先行(前頁、日本が主導)

⇒ これまでの技術蓄積の観点から、SFRはTRLが最も高く、実現性が一番高いと考える

技術開発の相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL7	フルスケールで、同様な(原型的な)システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL6	工学規模で、同様な(原型的な)システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL4	実験室規模で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための研究段階	TRL3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL1	基本原理を確認しているレベル

Technology Readiness Assessment Guide, U.S. DOE, DOE G 413.3-4A, 9-15-2011

高速炉技術の技術成熟度(TRL)評価結果



* 出典：第10回高速炉開発戦略WG(2018.6.1)資料2

* 出典：第10回高速炉開発戦略WG(2018.6.1)資料4(抜粋)

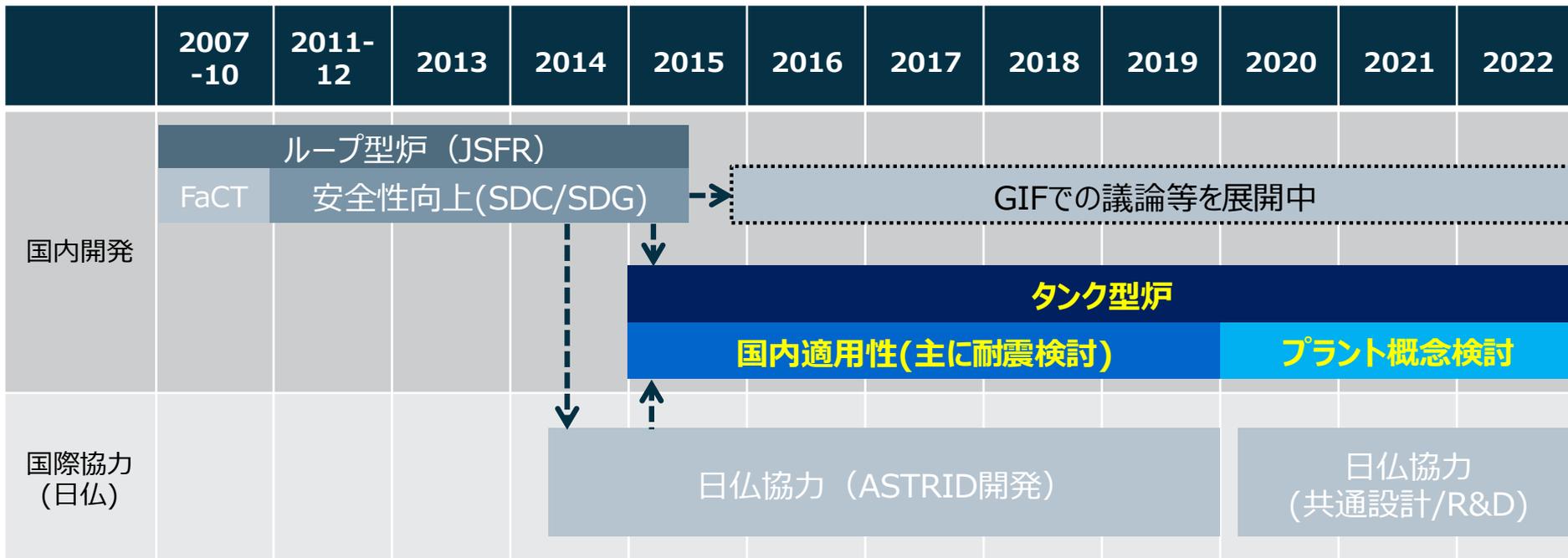
開発現況(2) – タンク型炉の検討(1) –

➤ 2015-19 : 「タンク型炉の国内適用性に関する検討」

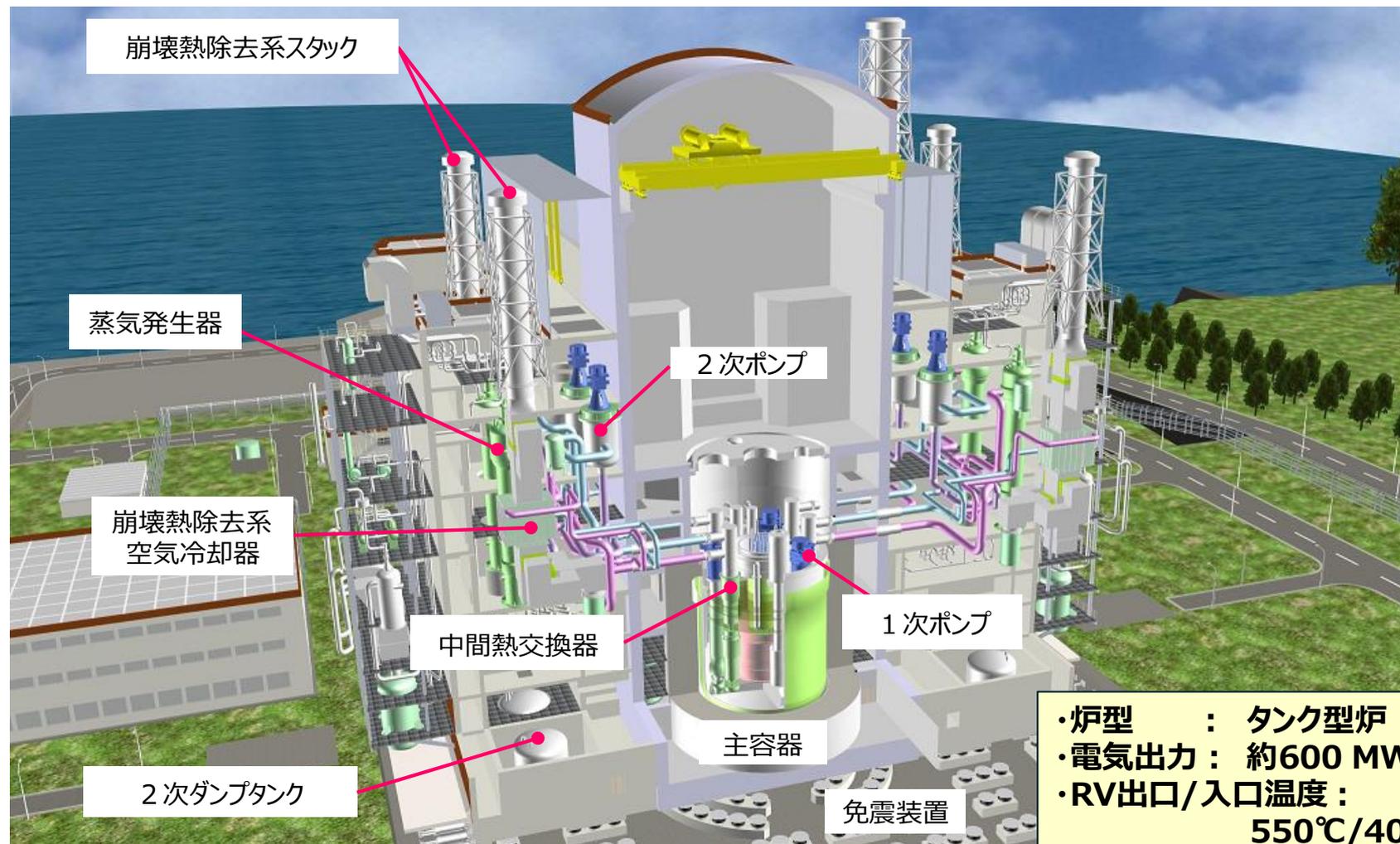
- JSFR(含;SDC/SDG)の検討成果、及び日仏協力(2014-)を通じ知り得た情報等を基に、ループ型炉より大型となる**タンク型炉原子炉構造の耐震成立性検討等**を通じ、タンク型炉概念の**概略の成立性を確認**

➤ 2020- : 「タンク型炉のプラント概念検討」

- FaCT開発目標や安全要求(SDC/SDG)に適合し、ループ型炉(JSFR)と同等の技術成熟度(TRL)を有する**タンク型炉概念**の構築を目的に、**プラント全域にわたる概念検討**を実施中



◆プラント概念検討は、2022年度も引続き実施予定



- ・炉型 : タンク型炉
- ・電気出力 : 約600 MW[e]
- ・RV出口/入口温度 : 550°C/400°C
- ・ループ数 : 4

◆ループ型炉、タンク型炉の両炉型を対象としたプラント概念検討と並行し、
ループ型炉とタンク型炉に共通する技術課題に対する研究開発、
及びタンク型炉に対し、重要性の高い研究開発を実施中(下表にその一部を示す)

	開発項目	目的
1	炉心耐震評価手法	地震時、水平時及び上下方向に変位し、相互に衝突する炉心構成要素の群振動挙動を評価可能な手法の開発
2	スロッシング評価手法	地震時のスロッシングにより、原子炉容器のナトリウム液面が原子炉容器天井へ衝突することで発生する荷重を評価可能な手法の開発
3	3次元免震システム	水平免震装置と同程度のスペースに配置が可能で、水平に加えて上下方向の地震力を低減可能な免震システムの開発
4	受動的炉停止系システム	高温で磁力を失う電磁石の特性のみにより、ナトリウムの温度上昇で制御棒の挿入が可能な炉停止システムの開発
5	高温中性子計装	原子炉容器内の高温条件で中性子を計測可能な装置の開発
6	ナトリウム中目視検査装置	超音波を用いて、不透明なナトリウム中での目視検査を可能とする検査装置の開発
7	座屈評価手法	高速炉機器の特徴である薄肉大口径容器の座屈評価手法の開発
8	高温構造材料特性の取得	500℃以上の高温で使用される構造材料の高温長時間材料特性データの取得

* 出典：三菱重工技報 Vol.57 No.4(2020)高速炉開発への取組み

◆ASTRID協力での主要実施項目

	分野	目的
1	設計	崩壊熱除去系、自己作動型炉停止機構、免震システム、ポーラテーブル(原子炉容器上蓋)、原子炉構造(コアキャッチャ、炉心上部機構、炉容器内熱流動、原子炉容器の構造健全性、等)
2	炉心・燃料	燃料等の照射計画、高燃焼度被覆管材料、等
3	シビアアクシデント	シビアアクシデント事象推移の評価、解析コード開発、等
4	原子炉技術R&D	材料(クリープ疲労等)、計測器(水素計等)、共同試験の検討、等

◆新たな協力で実施中の主要項目

	項目		
1	シビアアクシデント	7	数値シミュレーションツール
2	化学リスク	8	プラント機器開発
3	構造材料	9	試験施設
4	炉心材料	10	安全
5	燃料技術	11	新型構造
6	検査・計装		

*出典・参考:

[日本原子力学会 2019年春の年会 新型炉部会セッション資料 「\(1\)高速炉の国際協力の現状」より](#)

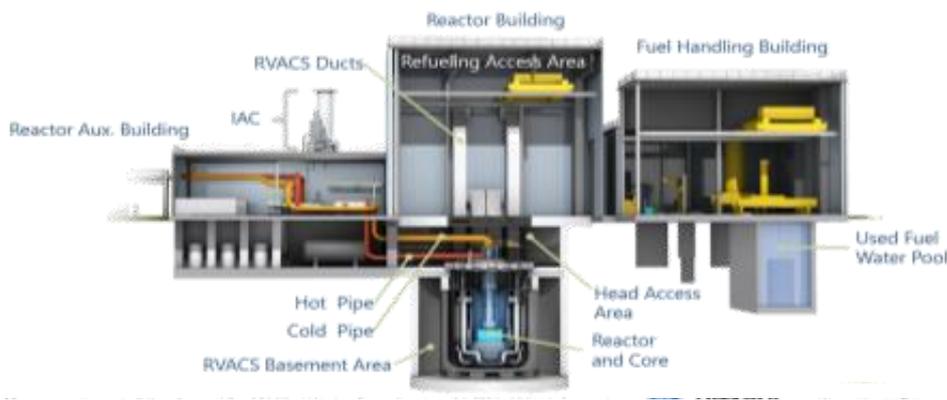
[三菱重工技報 Vol.57 No.4\(2020\)高速炉開発への取り組み](#)

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/010_s02_00.pdf

<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2019/120301/>

- 米国DOE支援の下、先進的原子炉設計の実証プログラム(ARDP)の中で、ナトリウム冷却高速炉「NATRIUM」を開発する米国テラパワー社と覚書を締結
- この協力により、日米間の高速炉開発協力を発展させていくとともに、高速炉開発に関する技術力の維持・向上を目指す

【原子炉建屋】



NATRIUM™の主要目

	NATRIUM™
原子炉出力	840MWt (345MWe)
燃料	金属燃料
1次冷却材	ナトリウム
原子炉型式	タンク型
2次系	熔融塩蓄熱システム (蒸気発生器)
崩壊熱除去系	RVACS*

*RVACS(Reactor Vessel Auxiliary Cooling System) :
原子炉容器補助冷却系 (空気の自然対流による容器外面冷却)

* 出典・参考 : <https://www.mhi.com/jp/group/mfbr/>

4. 高速炉開発の今後に向けて

- (1) 高速炉開発の方針～戦略ロードマップ
- (2) カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
- (3) 今後に向けて

国の開発方針(1)

◆高速炉開発の方針(2016.12政府決定) 要旨

- 今後の開発を進めるに当たり、以下の開発4原則に沿って対応
 - ・原則1 : 国内に蓄積した技術・知見・人材の徹底活用
 - ・原則2 : 国際ネットワークを利用した最先端知見の吸収
 - ・原則3 : 費用対効果の高い、コスト効率的な開発の推進
 - ・原則4 : 国、メーカー、電力、研究機関が密に連携し、責任関係を一元化した体制
- 高速炉開発は、長期にわたるプロジェクトで、将来を見据えた一貫性のある継続した取組が欠かせない。国内全ての関係者が、本方針を踏まえ、それぞれの責任を自覚し役割を果たしつつ、相互の連携を強化することにより、**着実に高速炉開発を進めていくことの重要性**を改めて強調したい
(世耕経産大臣、高速炉開発会議)

*参考 : https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kakuryo_kaigi/pdf/h281221_siryou1.pdf

◆戦略ロードマップ(2018.12政府決定) 要旨

- **Na冷却高速炉**とMOX燃料の組合せが燃料サイクル分野を含め国際的に**最も実績**
- **21世紀半ばの適切なタイミング**に、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から**現実的なスケール**の高速炉が**運転開始**されることを期待
- 我が国の今後の高速炉の研究開発では、これまでに培った技術・人材を最大限活用し、**多様な高速炉技術の競争を促進(今後の開発方針は以下の3ステップに区分)**
 - ・ステップ① : 競争を促し、様々なアイデアを試す(当面5年間)
 - ・ステップ② : 絞り込み、支援を重点化(2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込み)
 - ・ステップ③ : 今後の開発課題及び工程検討(現実的なスケールの高速炉の運転開始に向けた工程を検討)

*参考 : https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kakuryo_kaigi/pdf/h301220_siryou.pdf

【参考】 各国の動向(1)

- ロシア、中国、インド：実証炉（実用炉）開発を推進
- 日本：常陽の再稼働に注力、戦略ロードマップ(RM)を公表

	2022	2023	2024	2025	～2030	～2040	～2050
ロシア	BN-800 (800MWe 2014～)		BN-1200 (1200MWe 計画遅延中)		MBIR (1200MWe 計画遅延中)		
	CEFR (25MWe 2010～)		霞浦1 (600MWe 2017着工 2023～運転)		霞浦2(600MWe 2020着工)		
			PFBR (500MWe 近々運開の予定)				
日本			常陽 (100MWt 2024再稼働予定)				
	RMステップ1		RMステップ2		RMステップ3		

【参考】各国の動向(2)

➤ 前頁の各国は、原子力を重要なエネルギー源と位置付け、核燃料サイクルを推進し、ナトリウム冷却炉を主に、高速炉開発を推進



ロシアのナトリウム冷却高速炉開発の歴史



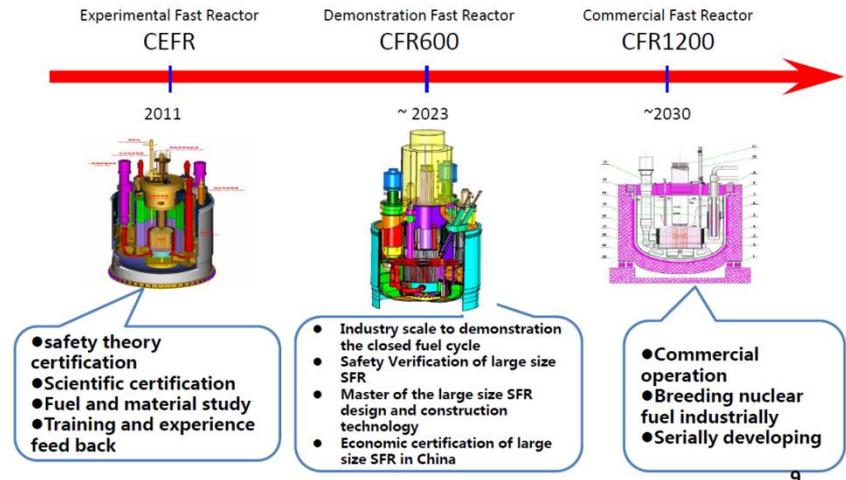
	BR-5/10	BOR-60	BN-350	BN-600	BN-800	BN-1200
型式	ループ	ループ	ループ	タンク	タンク	タンク
燃料	PuO ₂ / UPuO ₂	UO ₂ / UPuO ₂	UO ₂	UO ₂	UPuO ₂	UPuO ₂ / UPuN
増殖比	-	-	0.93	0.85	1.0	1.2-1.4
定格熱出力 (万kWt)	0.59/0.8	最大6*	75*	147*	210	280
電気出力 (グロス) (万kWe)	-	1.2	最大15	60	88	122
1次冷却材 出入口温度 (°C)	500 430	最大530 310-340	440 280	550 377	547 354	550 410
3次系パラメータ ・蒸気温度 (°C) ・蒸気圧 (MPa) ・給水温度 (°C)	-	480	410 4.9 160	505 14 240	490 14 210	510 17 275
備考	廃止措置準備中	* 発電と地域への熱供給	現在はカザフスタン、廃止措置中 * 発電と海水脱塩	* 発電と地域への熱供給		

* 出典：第5回高速炉開発会議戦略ワーキンググループ 資料1 (2017.10.31)



中国原子能科学研究院
中核集团 CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

Fast Reactor Development Strategy



* 出典：第4回高速炉開発会議戦略ワーキンググループ 資料2 (2017.9.14)

開発概況

ロシア

Na冷却高速炉は実用化目前
(鉛冷却炉開発も加速)

中国

ロシア・フランスの技術供与等で、
実証炉は2基を着工開始

インド

長期間の実験炉の運転経験を所有、
プロトタイプ炉(実質的な実証炉)は
運開目前

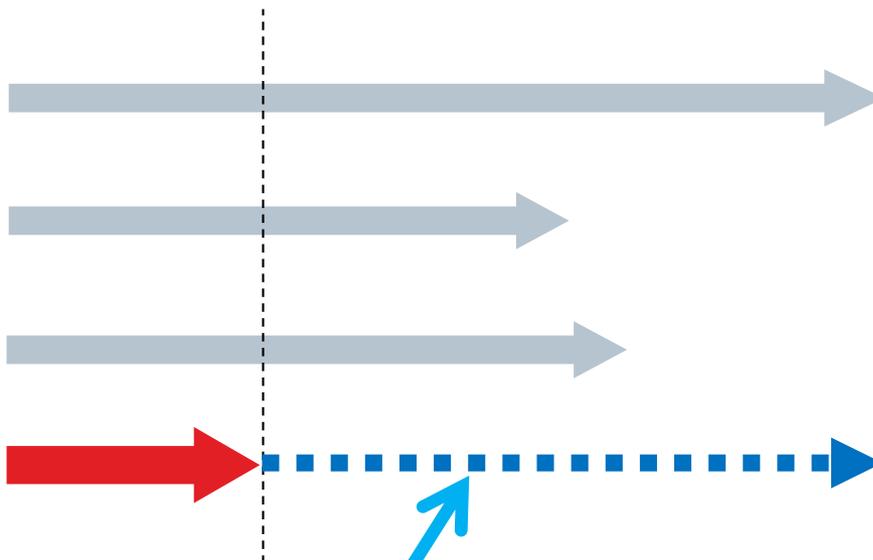
日本

もんじゅは廃炉、常陽は再稼働準備中、
次期炉は約30年後に運開

フェーズ①
実験炉

フェーズ②
実証炉

フェーズ③
実用炉



- ・次期炉建設は、もんじゅ事故、福島第一事故等により、延伸
- ・高速炉開発ロードマップの具体化・着実な遂行で、フェーズ②への速やかな移行が望まれる

◆カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021.6.18公表※) 要旨

※ 内閣官房、経産省、内閣府及び関係各省庁による

➤「高速炉開発の着実な推進」、を新たに追加 (⇒必要性が再認識された)

現状と課題 (抜粋)	今後の取組 (抜粋)
<ul style="list-style-type: none"> 原子力の持続的利用： <ul style="list-style-type: none"> 放射線廃棄物減容化・有害度低減 中長期的に資源有効利用に向け技術開発 世界各国で高速炉の開発進展 <ul style="list-style-type: none"> ロシア：実証炉を運転開始済 中国：実証炉建設中 北米：政府支援を得、企業等が開発加速 	<ul style="list-style-type: none"> 国際連携を活用し開発を着実に推進 <ul style="list-style-type: none"> 「戦略ロードマップ」に基づき、 今世紀半ば頃に現実的スケール高速炉の運開 2023年度末頃まで多様な技術間競争 日仏、日米協力で効率的開発 JAEA保有のデータ・施設を最大限活用 「常陽」の再稼働に向けた準備を速やかに推進

原子力産業の 成長戦略「工程表」

●導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ

●具体化するべき政策手法： ①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
高速炉	○戦略ロードマップに基づく開発 ステップ1 ・民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進		ステップ2 ・国、JAEA、ユーザーがメーカーの協力を得て技術を絞り込み（常陽等の施設を活用）			一定の技術が 選択される場合	ステップ3 ・工程の具体化	例えば21世紀半ば頃の適切なタイミングに、現実的なスケールの高速炉の運転開始を期待
	・国際協力を活用した効率的な開発 ・日仏協力(安全性・経済性の向上)・日米協力(多目的試験炉等)							

- ◆「グリーン成長戦略」により、「高速炉開発の必要性が再確認」された
- ◆これを踏まえ、関係機関による以下の検討・議論の加速が急務と考える
 - 高速炉開発に係る「戦略ロードマップ」の具体化
 - 高速炉開発会議/戦略WG等における開発プロセスの確認
 - 1) 開発目標(燃料サイクルとの整合性)
 - 2) 実用化工程(21世紀半ばに現実的スケールの高速炉を運開)
 - 3) 開発効率性(開発対象の絞込み、試験施設の有効利用、国際協力等)
 - 4) 開発体制確立(推進主体設置に向けた検討の進め方、サプライチェーン等)
 - 5) 開発費確保

5. まとめ

- 三菱重工とMFBRは、JAEAと共に、国内高速炉開発を着実に推進
- ループ型炉概念の構築に続き、国際協力も活用し、タンク型炉の概念検討を実施中
- 「グリーン成長戦略」などにより、高速炉開発の必要性が再認識されていることから、下記の推進が望まれる
 - 「戦略ロードマップ」の早急な具体化
 - 今後の開発プロセスの確認と、開発の加速

MOVE THE WORLD FORWARD