

(1) 第4世代原子炉の開発目標と展望

平成30年3月26日

日本原子力研究開発機構

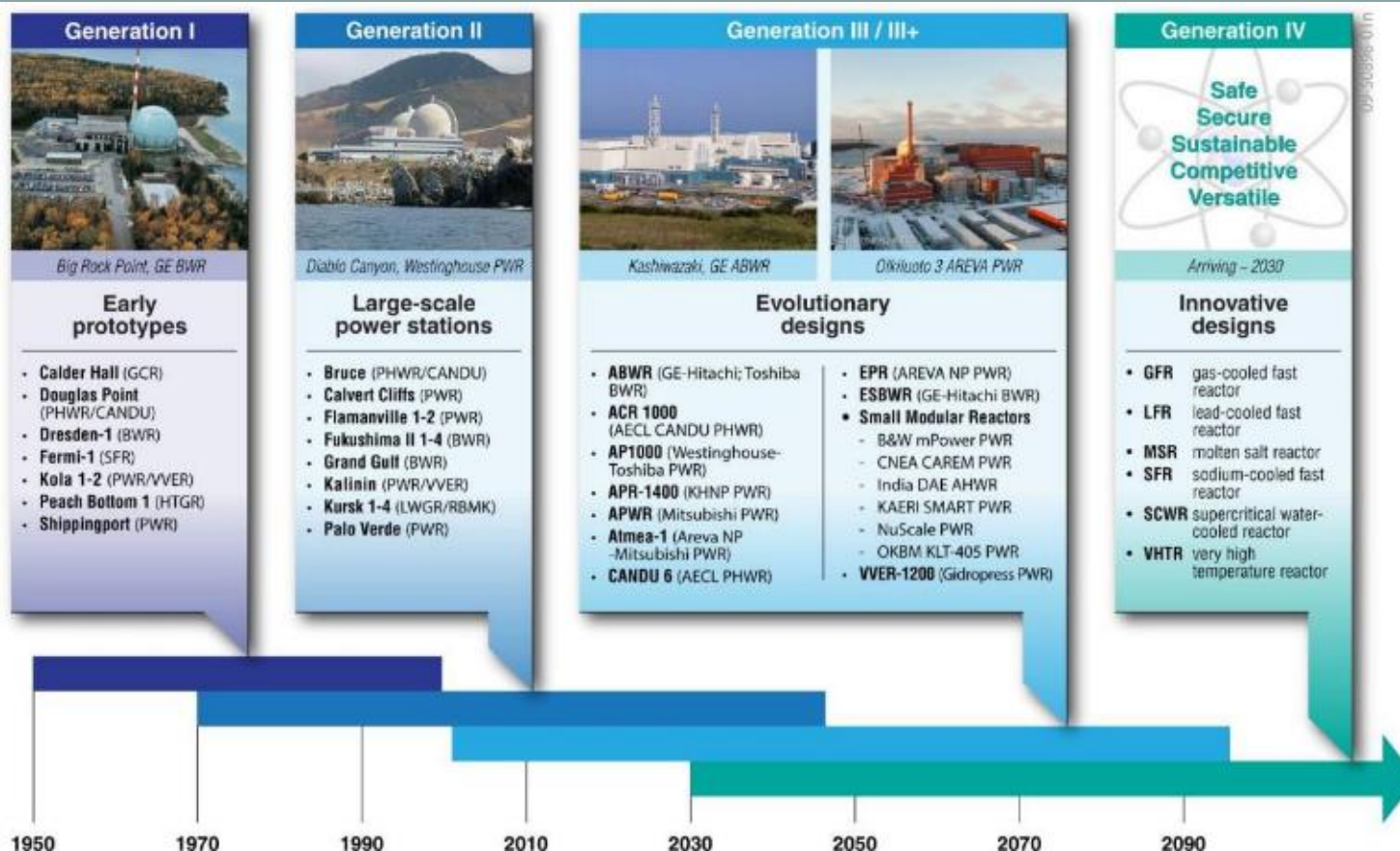
小野 清

本日の報告内容

1. 原子炉システムの「世代」
2. 第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF）の概要
3. 開発目標と設計仕様
4. GIFの6システム概念
5. 技術ロードマップと開発の現状
6. GIFの成果普及活動

1. 原子炉システムの「世代」

- 稼働中の発電用原子炉は、概ね第2～第3世代原子炉
- 今後の次世代原子炉として、**第3+世代炉**(EPR、ESBWR等)や**第4世代炉**がある。
 - 第3+世代炉は、第3世代炉に対してより先進的な安全方策を導入
 - 第4世代炉は、2030年頃の実用化を目標として、**第4世代原子炉システム国際フォーラム (GIF: Generation IV International Forum)**の場等で開発が進められている。



2. GIFの概要

これまでの経緯:

2001年 GIF憲章の署名

米、仏、日等9か国が署名 この後、2002年にスイス、
2003年にEuratom、2006年に中国とロシア、2016年に豪州が署名

2002年 6つの革新的原子力システム選定
GIF技術ロードマップの完成 <①>

2005年 枠組み協定(FA)の署名 <②>

2006～2010年 6つのGIFシステム全てについて、
「取決め」或いは「覚書」を署名



【歴代のGIF議長】



2003年～ 初代議長
米国 マグウッド氏
元DOE原子力局長、NRC委員
OECD/NEA事務局長



2006年～ 第2代議長
仏国 故ブシャール氏
元仏原子力開発局長



2010年～ 第3代議長
日本 佐賀山氏
元JAEA次世代部門長
GIF名誉議長



2013年～ 第4代議長
米国 ケリー氏
元DOE原子力局次官補代理
ANS次期会長



2016年～ 第5代議長
仏国 ゴーシェ氏
仏原子力開発局長

2. GIFの概要

(GIFメンバー: 13ヶ国と1機関)

	 カナダ	 中国	 仏国	 日本	 韓国	 ロシア	 南アフリカ	 スイス	 米国	 EU	 豪州	 英国	 ブラジル	 アルゼンチン
Na冷却高速炉 SFR		●	●	●	●	●			●	●				
超高温ガス炉 VHTR		●	●	●	●			●	●	●				
ガス冷却高速炉 GFR			●	●						●				
超臨界水冷炉 SCWR	●	●		●		●				●				
鉛冷却高速炉 LFR				△	△	△				△				
溶融塩炉 MSR			△			△		△	△	△				

● システム取決めの締結国・国際機関

△ 覚書(システム取り決め準備段階)の締結国

3. 開発目標と設計仕様

開発目標		設計仕様の例
安全・信頼性	安全・高信頼な運転	・ 通常運転時における高い安全性・信頼性
	炉心損傷の防止	・ 事故頻度の最小化、事故時でも炉心損傷を発生させない設計
	施設外の緊急時対応が不要	・ 放射性物質放出の可能性・量を最小化するようにシビアアクシデントの制御、緩和が出来る安全系
経済性	ライフサイクル・コストの低減 財政リスクの低減	・ 革新技術・材料によるコンパクトなプラントの追求 ・ 高燃焼度、高稼働率
持続可能性	放射性廃棄物最小化	・ マイナーアクチニド（MA）燃焼、長寿命FP蓄積防止
	高い燃料利用効率	・ MA燃焼によるウラン資源有効利用（軽水炉から高速炉サイクルへ）
核拡散抵抗性	核不拡散	・ 核物質拡散や制度悪用に対する制度的・技術的対策
	核物質防護	・ IAEA指針・法規、サイクル概念に適した防護システムの採用

3. 開発目標と設計仕様(その1:安全・信頼性)

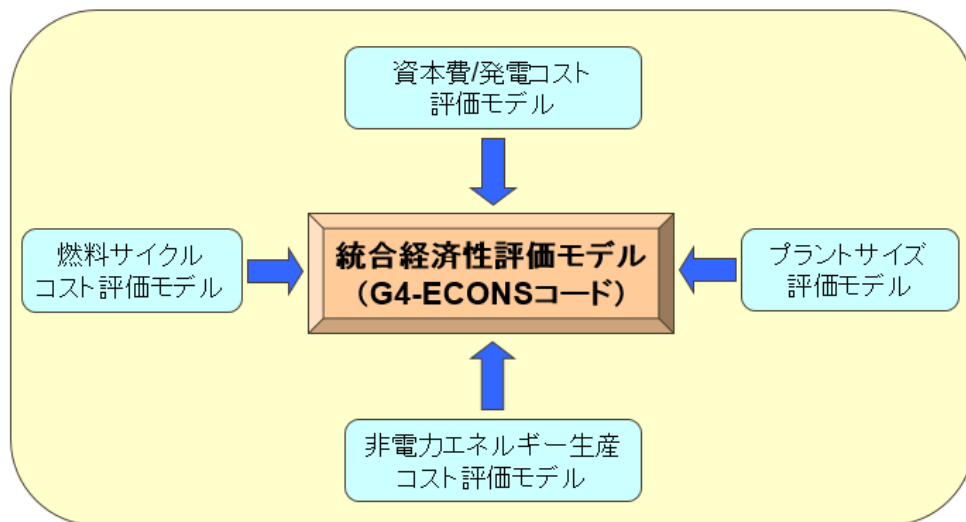
開発目標		設計仕様の例
安全・信頼性	安全・高信頼な運転	・ 通常運転時における高い安全性・信頼性
	炉心損傷の防止	・ 事故頻度の最小化、事故時でも炉心損傷を発生させない設計
	施設外の緊急時対応が不要	・ 放射性物質放出の可能性・量を最小化するようにシビアアクシデントの制御、緩和が出来る安全系



SDC：安全設計クライテリア、SDG：安全設計ガイドライン

3. 開発目標と設計仕様(その2:経済性)

開発目標		設計仕様の例
経済性	ライフサイクル・コストの低減 財政リスクの低減	- 革新技術・材料によるコンパクトなプラントの追求 - 高燃焼度、高稼働率



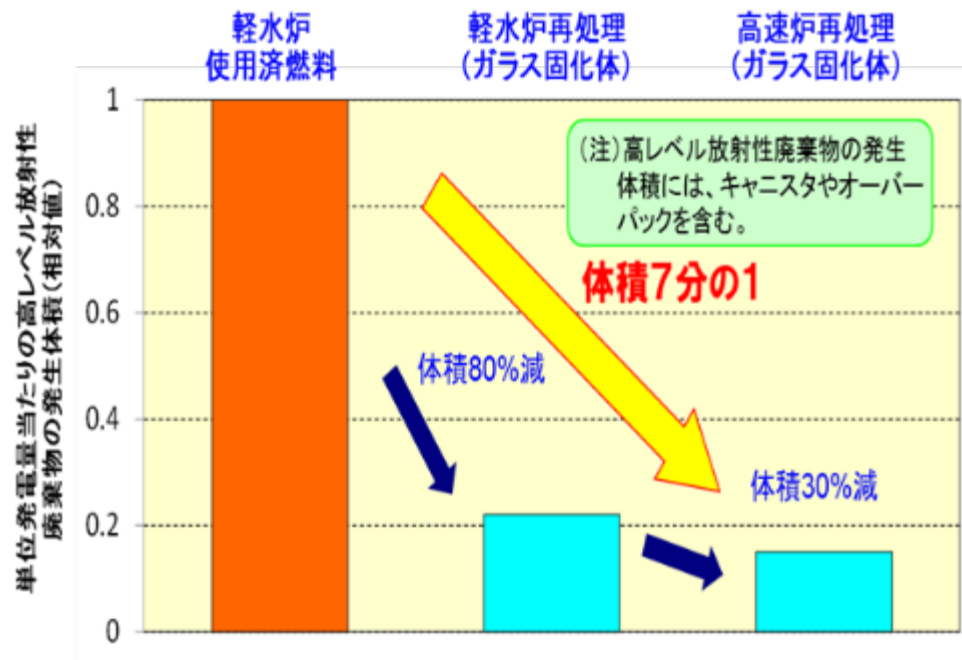
経済性向上方策 (JSFRの例) :

- 燃料の高燃焼度化 (15万MWd/t) と長期運転サイクル (18~26ヶ月) による燃料費及び運転費の低減
- 2ループ構成で大出力化 (150万kW級)、高クロム鋼による配管短縮、ポンプ組込型中間熱交換器等の採用によるプラント物量削減による建設費の低減

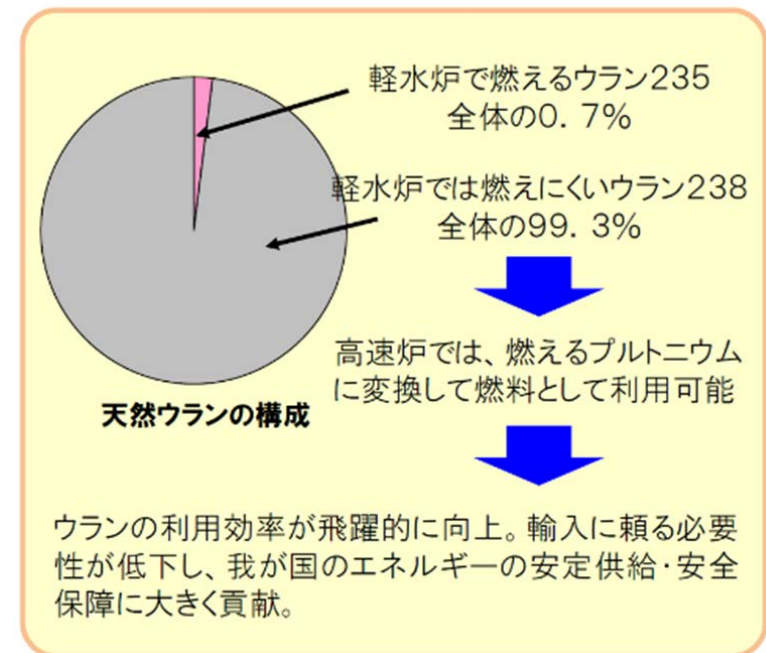
統合経済性評価モデル(G4-ECONS)の構成

3. 開発目標と設計仕様(その3: 持続可能性)

開発目標		設計仕様の例
持続可能性	放射性廃棄物最小化	・ マイナーアクチニド (MA) 燃焼、長寿命FP蓄積防止
	高い燃料利用効率	・ MA燃焼によるウラン資源有効利用 (軽水炉から高速炉サイクルへ)



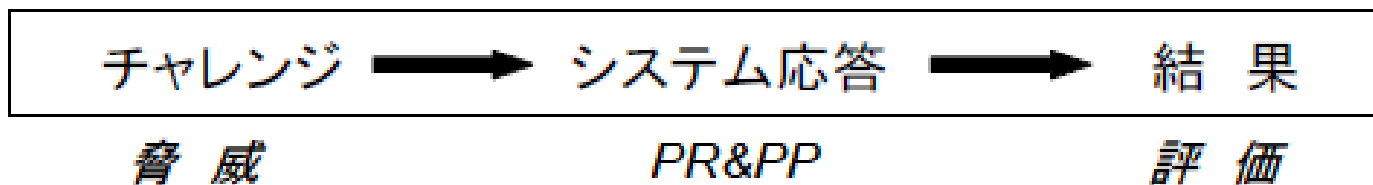
廃棄物発生量の低減



ウラン資源の有効利用

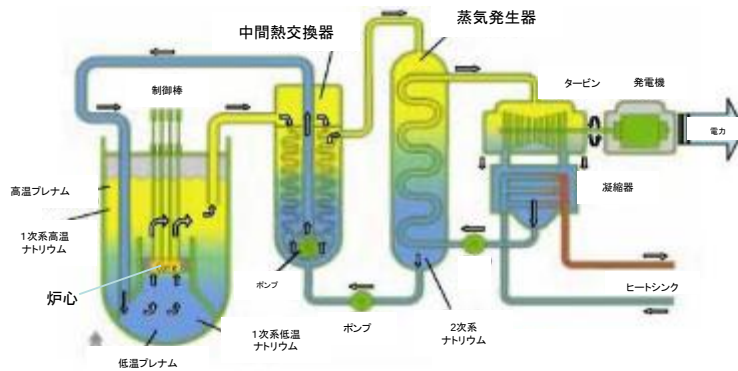
3. 開発目標と設計仕様(その4:核拡散抵抗性)

開発目標		設計仕様の例
核拡散抵抗性	核不拡散	・ 核物質拡散や制度悪用に対する制度的・技術的対策
	核物質防護	・ IAEA指針・法規、サイクル概念に適した防護システムの採用



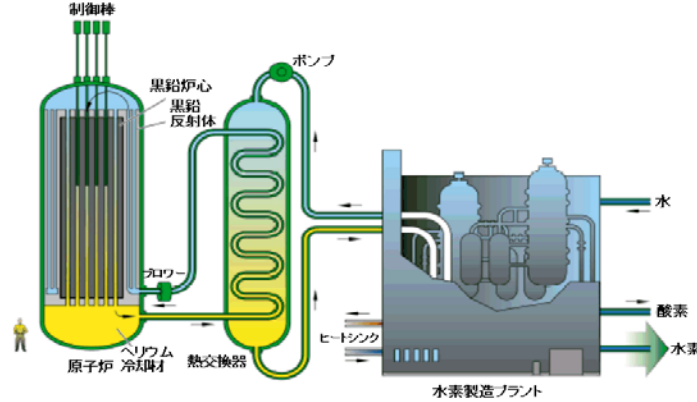
- 提案された原子力システム (NES) 設計に対して、一連の**チャレンジ**を定義し、これらのチャレンジに対する**システム応答**を解析して結果を評価する。
- NESに対するチャレンジは、潜在的な拡散者（拡散を意図する国家または非国家主体の敵対者）によって引き起こされる脅威（Threats）である。
- GEN-IV システムが有する特性は、技術的特性及び制度的特性の両方において、**システムの応答**を評価し、その拡散脅威に対する抵抗性と、妨害破壊行為及びテロの脅威に対する抵抗性を決定するために用いられる。
- このシステム応答の**結果**は、核不拡散 (PR) に対しては6個の指標 (Measures)、核物質防護 (PP) に対しては3個の指標によって表現される。

4. GIFの6システム概念



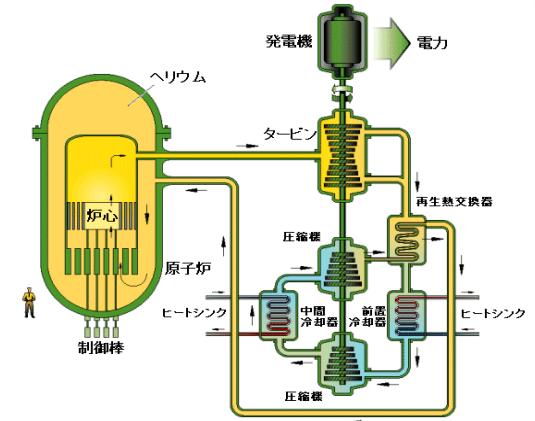
ナトリウム冷却高速炉(SFR)

- 技術的に最も成熟。革新技術の導入による安全性・経済性等の向上



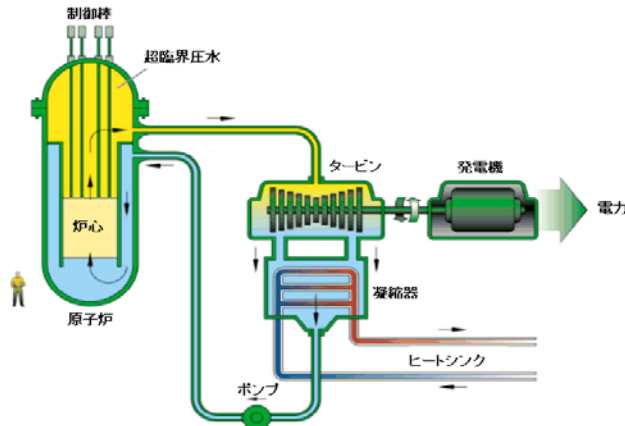
超高温ガス炉(VHTR)

- 高温ガス(900~1000℃)の産業利用



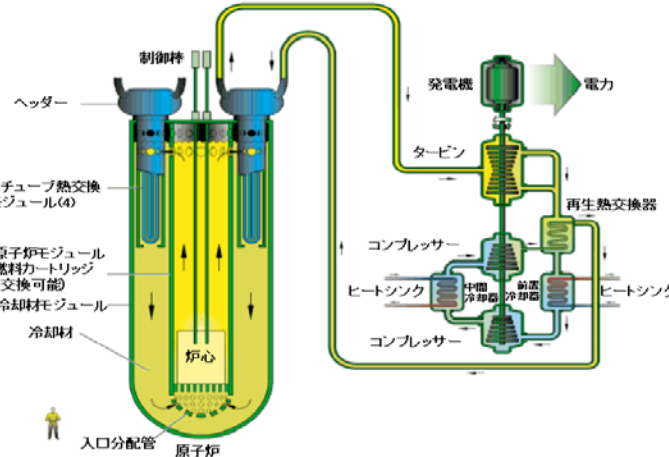
ガス冷却高速炉(GFR)

- 化学的に活性なナトリウムの代わりにヘリウムガスを採用



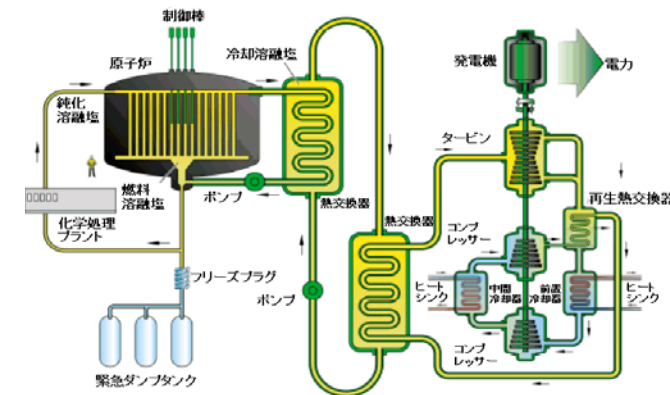
超臨界水冷却炉(SCWR)

- 超臨界水(374℃、22.1MPa以上)を用いた装置のコンパクト化と熱効率向上



鉛冷却高速炉(LFR)

- 化学的に活性なナトリウムの代わりに鉛を採用



溶融塩炉(MSR)

- 図は、液体燃料を使用した熱中性子炉の概念。現在は、高速炉概念を中心に検討中

4. GIFの6システム概念

システム	中性子 スペクトル	冷却材	出口温度 (°C)	燃料サイクル	出力 (万kWe)
ナトリウム冷却 高速炉 (SFR)	高速中性子	ナトリウム	500-550	クローズド	5-150
超高温ガス炉 (VHTR)	熱中性子	ヘリウム	900-1000	オープン	25-30
ガス冷却高速炉 (GFR)	高速中性子	ヘリウム	850	クローズド	120
超臨界水冷却 炉(SCWR)	熱中性子/ 高速中性子	水	510-625	オープン/ クローズド	30-150
鉛冷却高速炉 (LFR)	高速中性子	鉛	480-570	クローズド	2-120
熔融塩炉 (MSR)	熱中性子/ 高速中性子	フッ化物塩	700-800	クローズド	100

VHTRやLFR等では、発電以外の用途として水素製造、産業への熱利用、海水の淡水化の可能性についても検討している。

5. 技術ロードマップと開発の現状

＜第4世代炉実用化までの開発 3 段階＞

① 成立性確認段階 (Viability Phase)

基本概念の試験実施及び基本的技術課題の解決



② 性能確認段階 (Performance Phase)

工学規模のプロセス・現象・材料の確認と原型規模での実証



③ 実証段階 (Demonstration Phase)

実用化に繋がるシステムの詳細設計・許認可・建設・運転

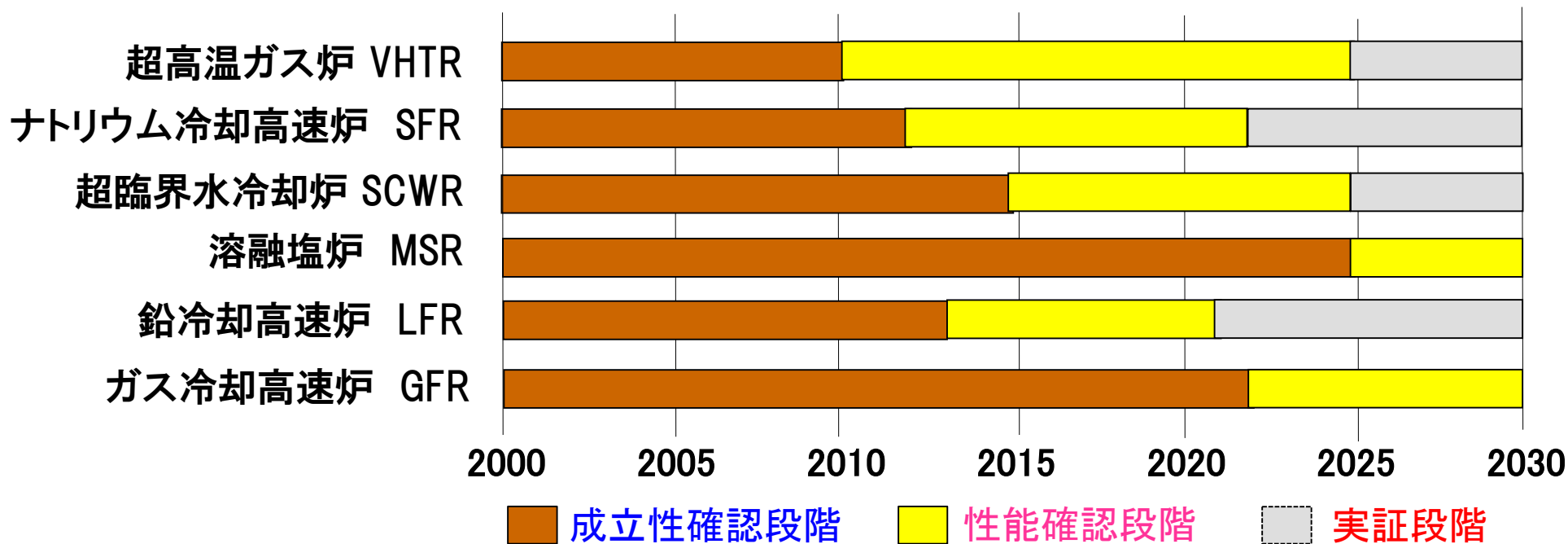
(注) これまでのGIF協力は、①・②が主な対象。

(第4世代炉の実用化目標時期は「2030年以降」)

5. 技術ロードマップと開発の現状

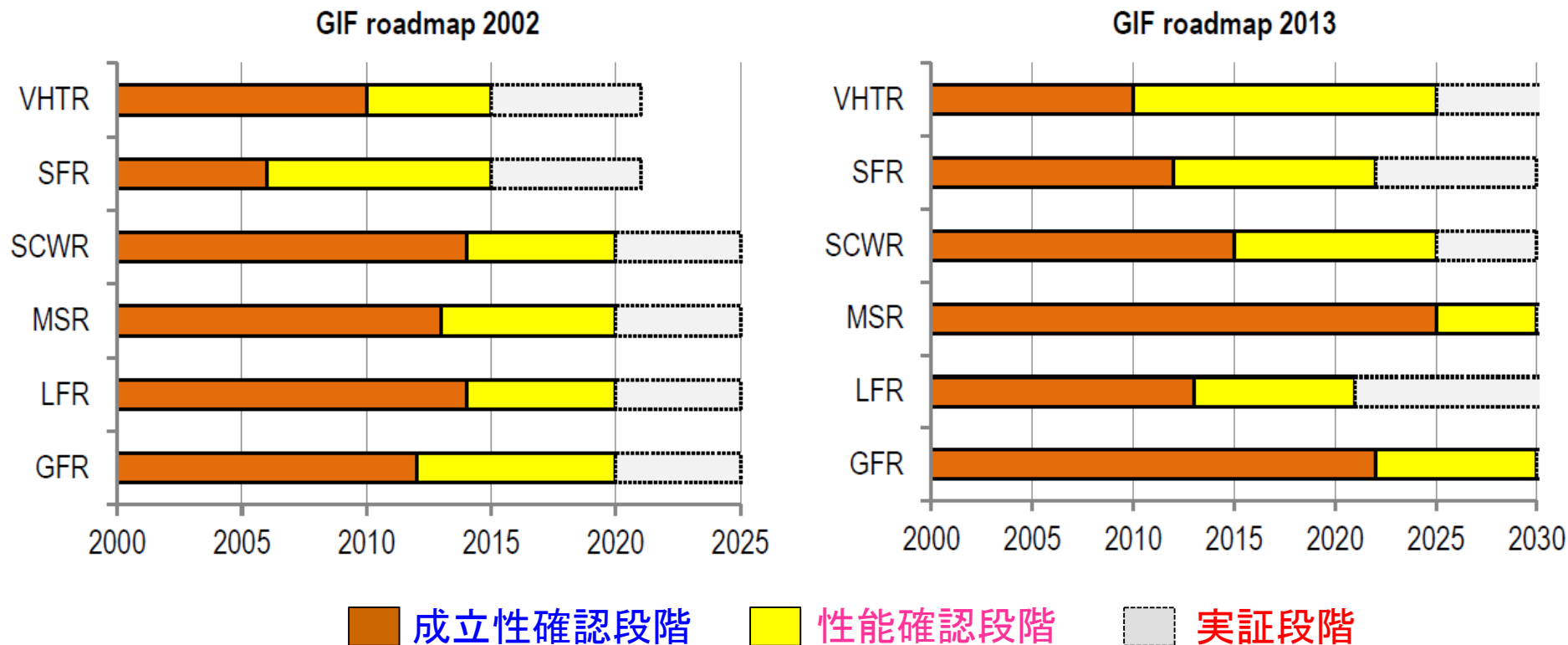
各炉型の開発スケジュール見通し(技術ロードマップ)

- 第4世代炉の開発は、候補概念システムや関連枢要技術の成立性を確認する「成立性確認段階」、その次に工学的規模での実証等を含めた「性能確認段階」を経て、原子炉システムとしての実証段階に至ると想定している。
- GIFでは実証段階に至る前までを対象に研究協力を実施中
- 2014年1月に、GIF技術ロードマップを改定



5. 技術ロードマップと開発の現状

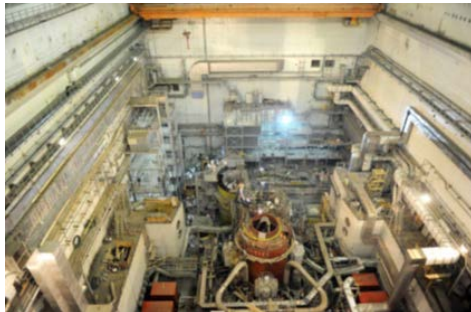
2002年と2013年のロードマップ



出典： A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, US DOE & GIF, Dec.. 2002
 Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, OECD/NEA for GIF, Jan. 2014

5. 技術ロードマップと開発の現状

各炉型の開発概況



SFR: 露BN-800(上、2016年運開)
約400炉・年(約20炉)の運転実績



Peach Bottom 1
1966-1974



Fort St Vrain
1976-1989

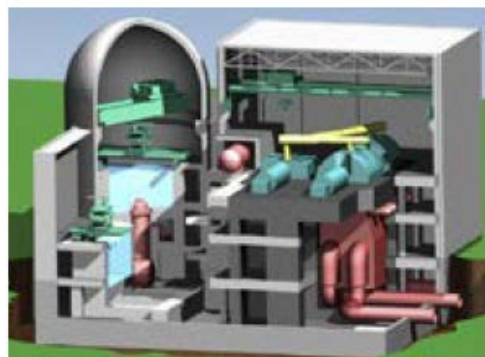


THTR
1986-1989

高温ガス炉: 上記発電炉と共に、多くの試験炉(HTTR日本、HTR-10中国)の運転実績

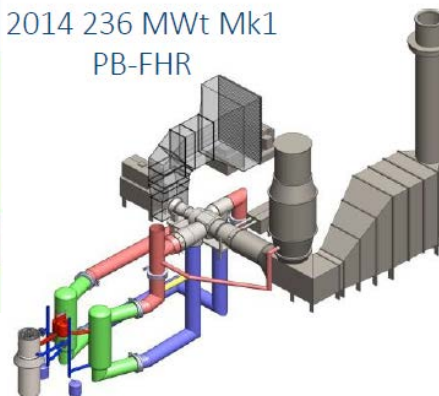


ガス高速炉: 欧州におけるAllegro炉(75MWth)計画

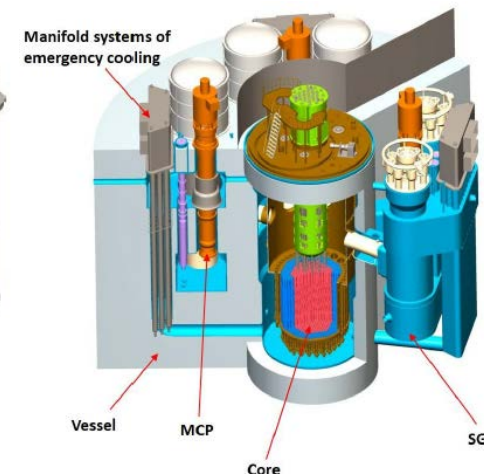


SCWR: 加、中、欧、日(上図)での設計

2014 236 MWt Mk1
PB-FHR



熔融塩炉: FHR設計(粒状燃料、フッ化物冷却材)の進展



鉛冷却炉: 露BREST-300炉建設計画

GIFの成果普及活動

1) GIFシンポジウム (3年毎に開催)

	日 時	場 所
第1回	2009年 9月	仏、パリ
第2回	2012年11月	米、サンディエゴ
第3回	2015年 5月	日、幕張
第4回	2018年10月	仏、パリ



4th GIF Symposium 16-17 October 2018

at the 8th edition of Atoms for the Future
UIC Paris, France

共通セッション及び技術セッション（下記の11Tracks）

Track 1 & 2: Progress on Gen IV systems

Track 3: Human capital development

Track 4: Research infrastructures

Track 5: Safety and security

Track 6: Fuels and materials

Track 7: Advanced components and systems for Gen IV reactors

Track 8: Integration of nuclear reactors in low carbon energy systems

Track 9: Decommissioning & Waste Management

Track 10: Operation, Maintenance, Simulation & Training

Track 11: Construction of nuclear reactors

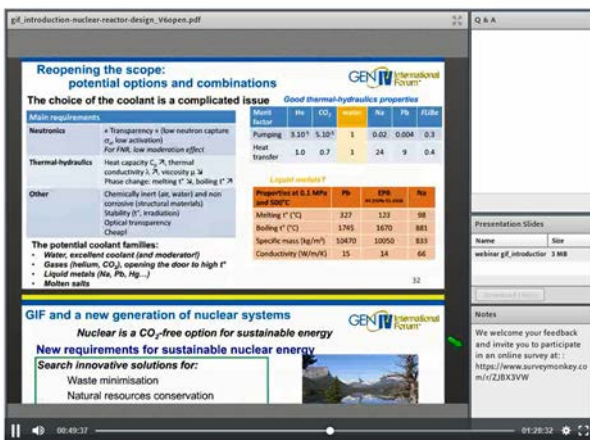
Abstract 400Words
締切 3月末に延長

2) GIFウェブ技術解説シリーズ

(GIF Website内、各1時間程度、2016年9月～継続中)

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_84279/webinars

解説スライドはダウンロード可能



解説のテーマ	
第1回	次世代原子力システム (米Kelly DOE次官補代理)
第2回	核燃料サイクル (韓Youngsan大 Yang教授)
第3回	原子炉設計 (仏CEA Renault博士)
第4～10回	GIF 6 炉型
第11回～	各種の技術テーマ (燃料、材料、発電、経済性、安全性、他)
昨年11月	Phenix, Superphenix (仏CEA Guidez博士)
3月21日	MYRRHA炉のR&D (ベルギー-SCK-CEN Abderrahim博士)
4月18日	BN 600とBN 800 (露 IPPE Ashurko博士)
5月23日	核拡散抵抗性 (米ブルックヘブン国立研 Bari博士)

ご清聴、ありがとうございます。

補足スライド

次世代炉開発の国際協力枠組み

	開始年	目的と次世代炉開発への取組	参加国
IAEA/INPRO (革新的原子炉及び燃料 サイクルに関する国際プロ ジェクト)	2001 ～	- 革新的原子力システムを導入するための評価手法や制度の整備を目的 - 高速炉を用いた閉燃料サイクルの評価、世界的原子力ビジョン共同研究等を実施	41カ国＋ 1機関
IAEA/TWG (各炉型別の技術ワーキン ググループ)	1967 ～ (TWGFR)	- 各国の専門家により、IAEA原子力技術開発局の活動への支援・アドバイスを提供 - 高速炉、ガス冷却炉、先進的軽水炉、先進的重水炉、淡水化の5つのWG	18カ国＋ 2機関 (TWGFR)
OECD/NEA NI2050 (原子力革新2050イニシア ティブ)	2015 ～	- 低炭素社会実現のため、将来を見据えた原子力の研究開発と革新技術の実証のため、2050年までを見据えたロードマップの策定 - 第2世代炉から第4世代炉を対象に、原子炉と関連する核燃料サイクルの技術開発を検討	31カ国 (NEA)
EURATOM Horizon2020 (革新的開発の促進枠組)	2013 ～	- 全欧州規模で実施される最大規模の研究及び革新的開発を促進するためのフレームワークプログラム 2014年より2020年までの7年間にわたり、約800億ユーロの公的資金が提供される。	46の原子 力関連プロ グラム (2018年1月)

GIF 運営組織

政策Gr (PG)

GIF全体の運営として、参加手続き、規定策定などを行うと共に、他の国際協力活動との相互協力も進める。

専門家Gr (EG)

各システム共通のテーマについて協議する。

システム運営委員会 (SSC)

研究開発計画の作成、協力実施を進める。

プロジェクト管理委員会 (PMB)

協力プロジェクト毎の計画作成、協力実施を進める。

評価手法検討Gr (MWG)

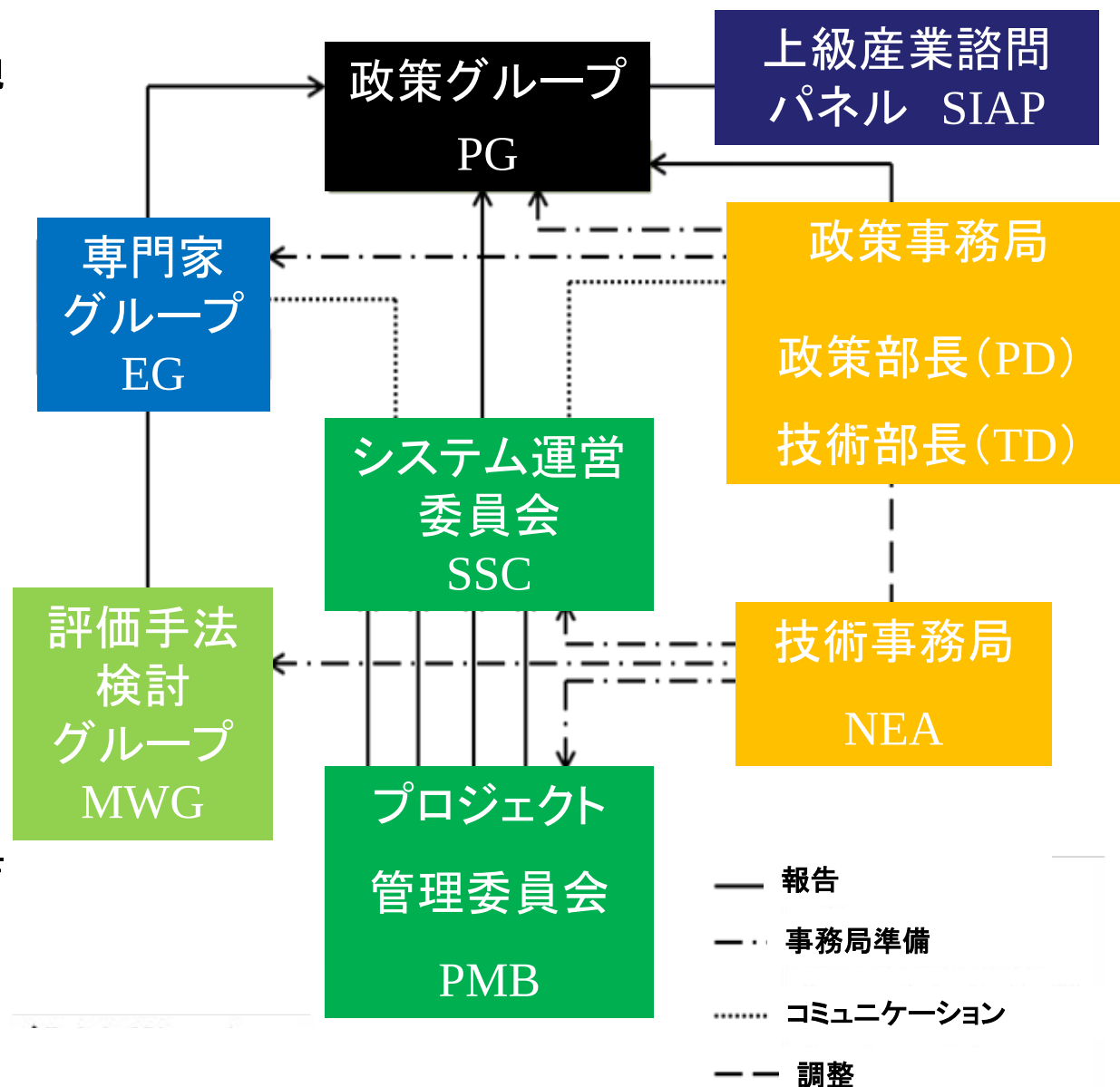
核拡散抵抗性・核物質防護、リスク・安全性、経済性に関する評価手法の検討。

上級産業界諮問パネル (SIAP)

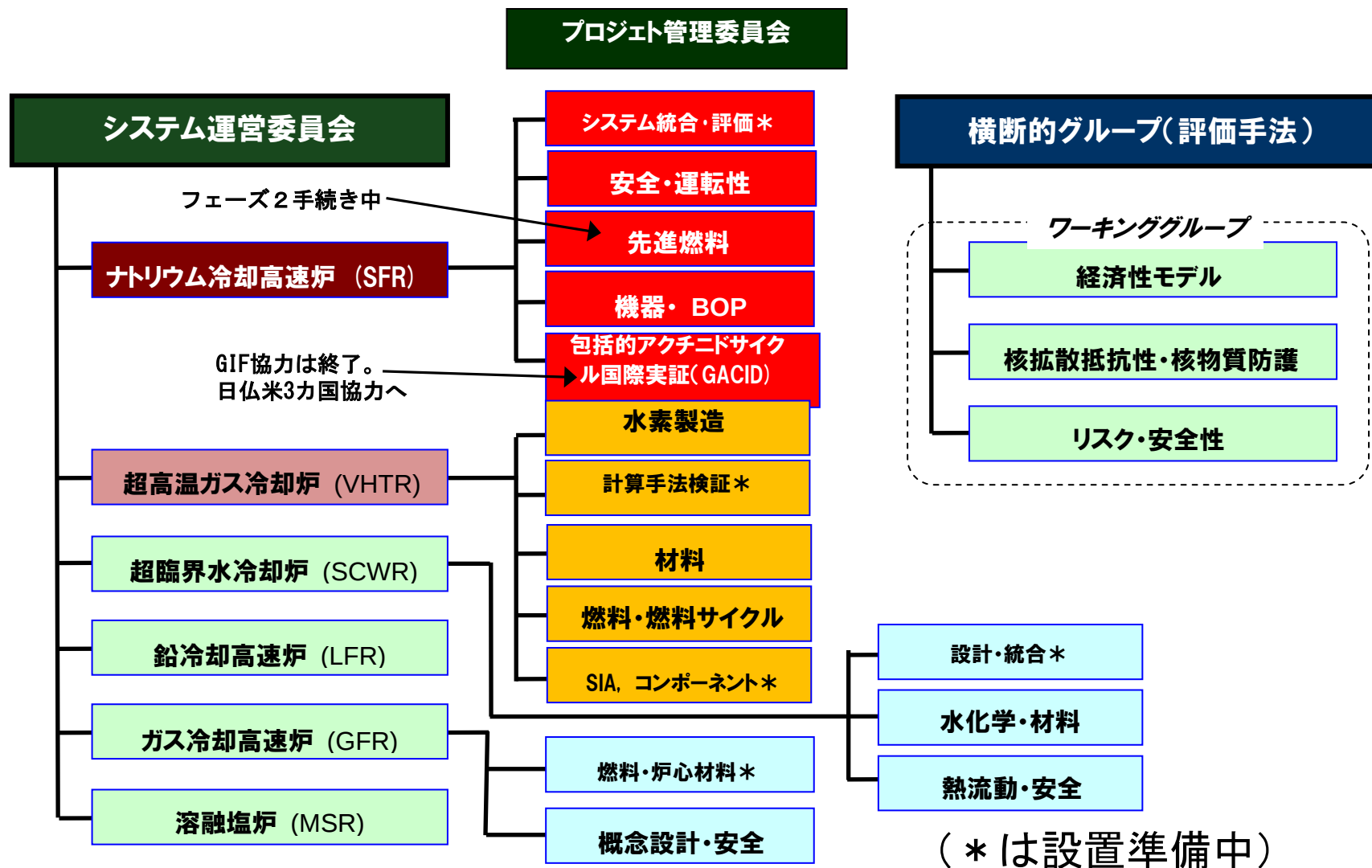
投資リスク低減など産業界の視点をGIF活動に取り入れる。

技術事務局 (TS)

OECD/NEA
MWG, SSC, PMBの会議事務局。



技術的検討に関する各種GIF委員会の構成



PR及びPPの指標

PRの指標

- ・ **拡散の技術的困難性 (TD)**

拡散行為に対する固有の困難性で、拡散に対する多重障壁を突破するために要求される技術の高度化および核物質取扱能力の必要性により生じる。

- ・ **拡散コスト (PC)**

拡散に対する多重障壁を突破するために必要とされる経済的・人的投資（既存あるいは新設の施設使用を含む）

- ・ **拡散時間 (PT)**

拡散に対する多重障壁を突破するためにかかる最小の時間（すなわち、そのプロジェクトのためにホスト国によって計画される全時間）

- ・ **核分裂性物質のタイプ (MT)**

核爆発装置に利用する際の核物質の有用性に対して、核物質の特性が与える影響の程度に基づく分類

- ・ **検知確率 (DP)**

拡散のセグメントあるいはパスウェイを検知する累積確率

- ・ **検知リソースの効率 (DE)**

NESに国際保障措置を適用するための、人、装置及び資金の利用効率

PPの指標

- ・ **敵の成功確率**

敵対者がパスウェイに記述される行為を成功裏に完了し結果を生み出す確率

- ・ **影響**

パスウェイに記述される敵対者の行為が成功裏に完了することによる影響

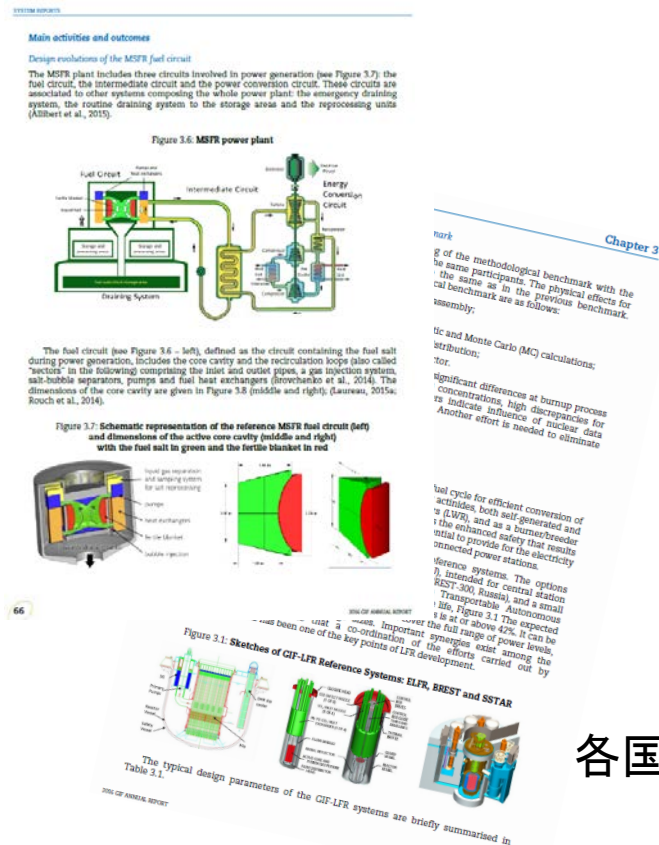
- ・ **核物質防護リソース**

バックグラウンドスクリーニング（身元審査）、検知、妨害及び無効化のような核物質防護を提供するのに要する、人、能力及びコスト。また、脅威の高度化と能力の変化に対するこれらのリソースの感度

3) GIF年報

(GIF Website内からダウンロード可能)

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9373/publications



目次 (2016年版の例、全162頁)

第1章	メンバー国・運営組織・取決め等
第2章	各国における原子力の概況
第3章	GIF 6 炉型運営委の活動報告
第4章	評価手法3Grの活動報告
第5章	タスクフォースの活動報告
第6章	上級産業界諮問委 (SIAP) の活動報告

各国の第4世代炉R&Dが英語で分かりやすく解説されている。