第４世代原子力システムの国際協力と我が国の研究開発の状況

（１）第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)における最新の取り組み状況

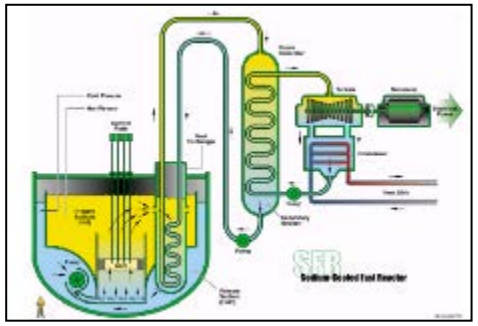
上出　英樹
日本原子力研究開発機構発機構

第4世代原子力システム国際フォーラムとは

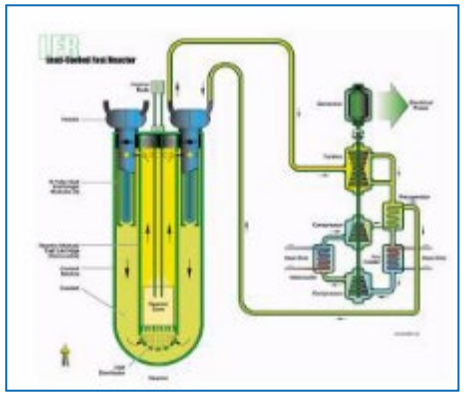
第4世代原子力システム国際フォーラム
（Generation-IV International Forum)

- 第4世代原子力システムの研究開発を多国間協力で推進することを目的に2001年7月に発足した国際協力の枠組み
- 第4世代原子力システムとしての開発目標を設定
- 13ヶ国1機関（アルゼンチン、豪州、ブラジル、カナダ、フランス、日本、中国、韓国、南アフリカ、ロシア、スイス、英国及び米国及びユーラトム）が参加。

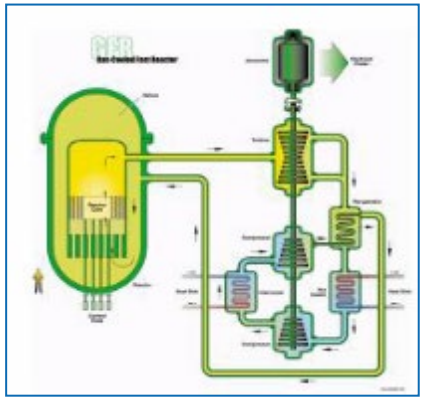
第４世代炉の６つの炉システム



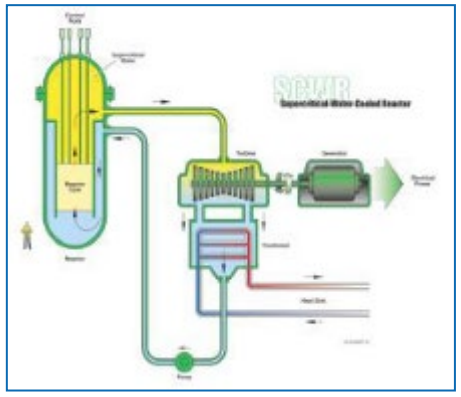
Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)



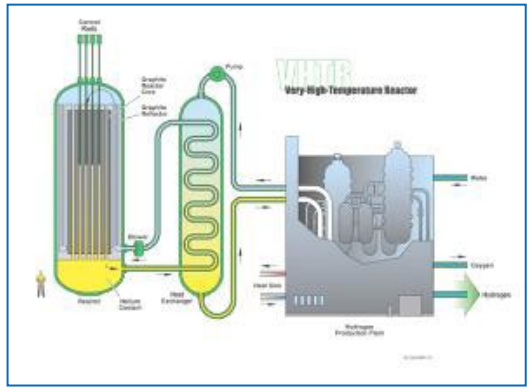
Lead-cooled Fast Reactor (LFR)



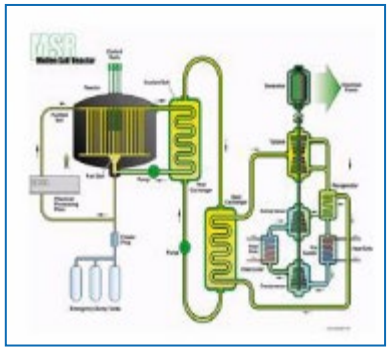
Gas-cooled Fast Reactor (GFR)



Supercritical Water cooled Reactor (SCWR)



Very High Temperature Reactor (VHTR)



Molten Salt Reactor (MSR)

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

GIF加盟国の参加状況

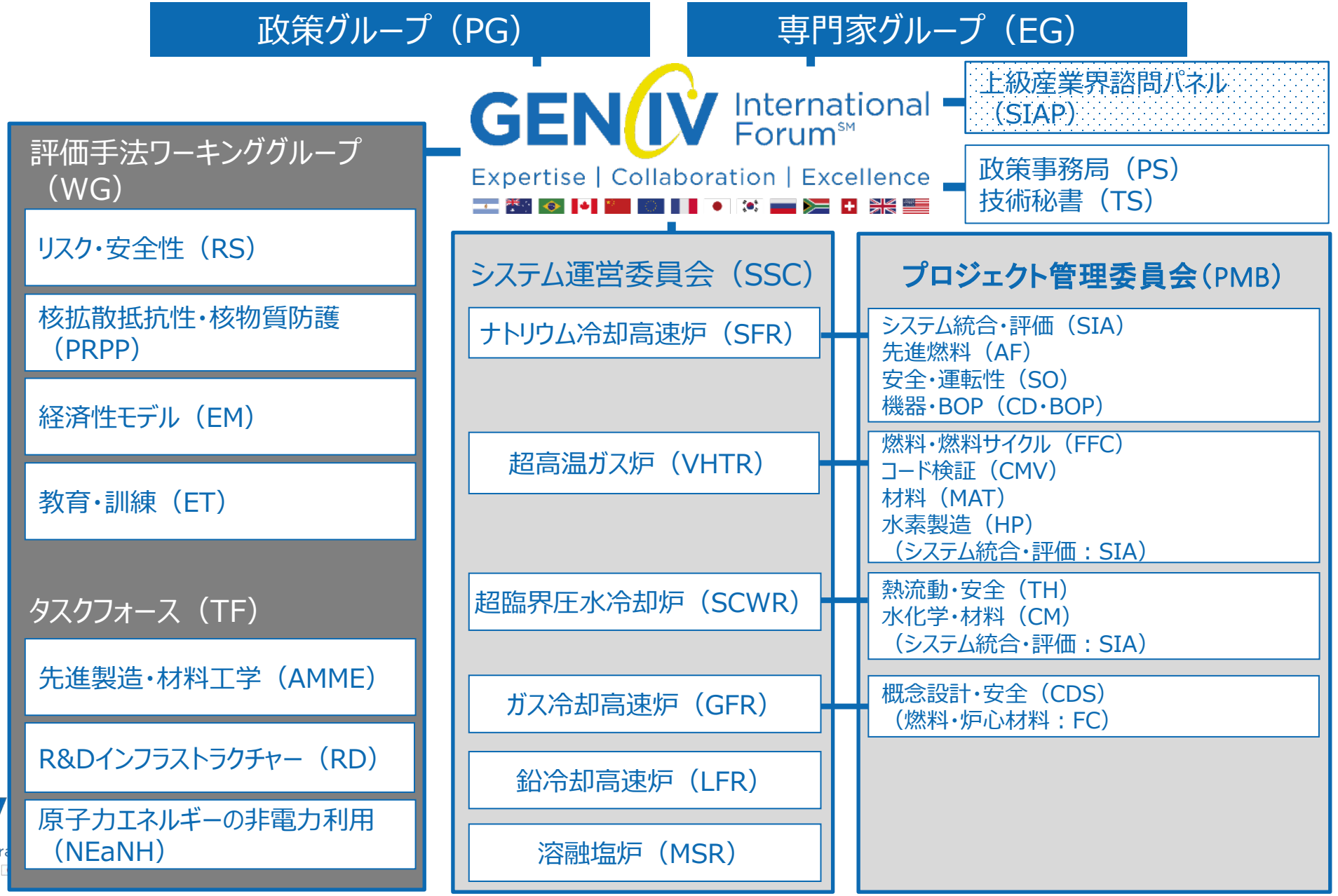
SFR			●	●	●	●	●			●	●	●
VHTR	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●
LFR			●		●	●	●			●		●
SCWR		●	●		●		●					●
GFR				●	●							●
MSR	●	●		●			●		●	●		●

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

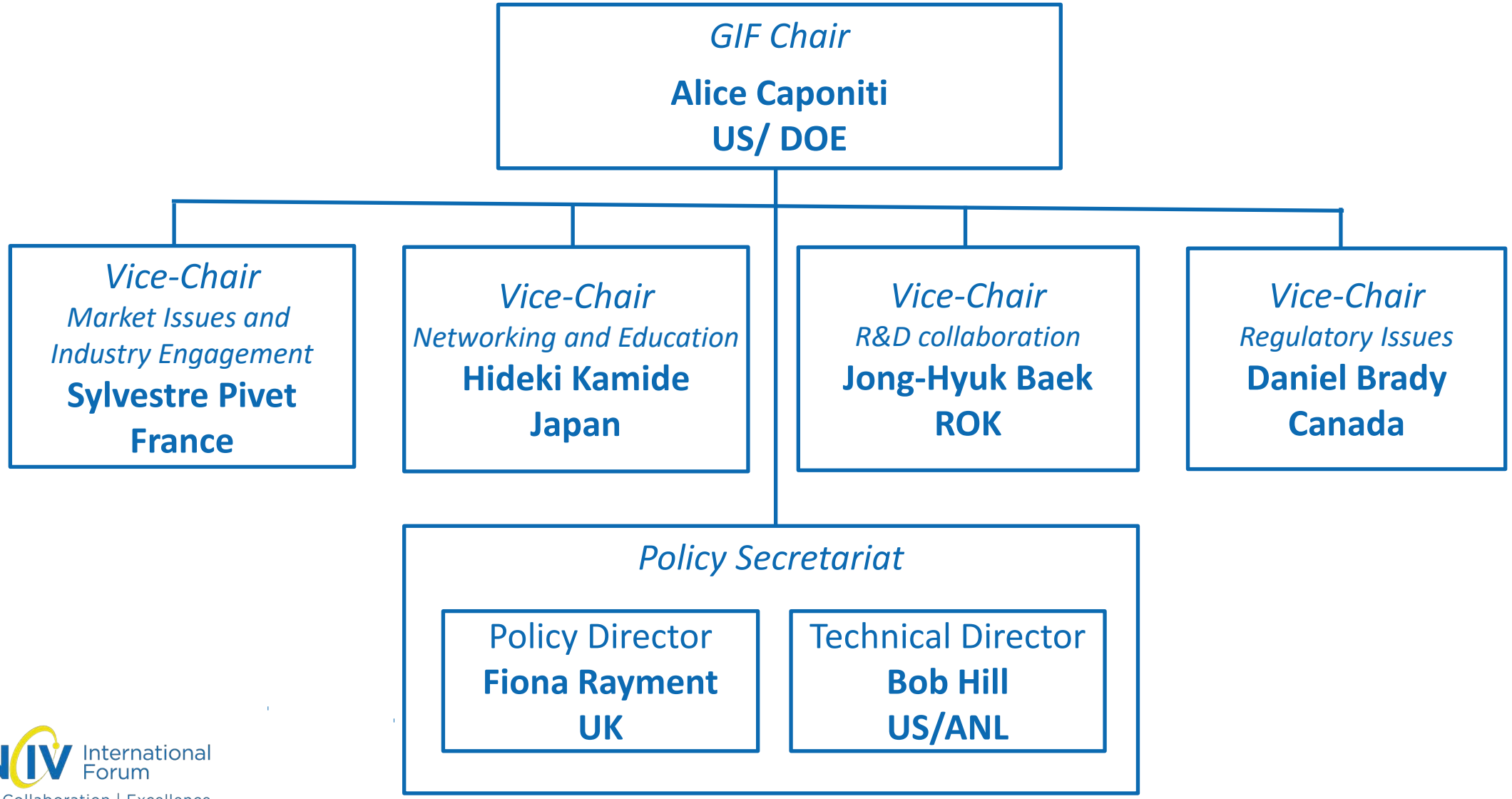
GIFのミッション（2019–2021年）

- 市場機会の拡大と炉の建設にむけてのチャレンジ
  - 産業界との連携（ SMR開発企業を含む）
  - 柔軟性の向上と非発電分野での原子力利用・カップリング
- 安全性と規制
  - 規制との連携強化（IAEAの安全局やOECD/NEAのWGSAR）
  - SFRを始めとする安全設計要件とガイドラインの開発と対象炉型の拡大
- 研究開発協力の拡大
  - 研究開発インフラの利用拡大
  - 製造技術革新
- GIF成果の発信とコミュニケーションの強化（人々、政策立案者、規制、産業界）
  - GIFニュースレター、Websiteの刷新
  - IAEA、NICE Future (Clean Energy Ministerial; CEM), World Nuclear Association (WNA)
  - 育成とナレッジマネージメント
    - ✓ Webinarの強化と利用性向上

GIFの組織構成


政策グループ（PG）
専門家グループ（EG）
GEN IV International Forum SM
Expertise | Collaboration | Excellence
上級産業界諮問パネル（SIAP）
政策事務局（PS）
技術秘書（TS）
評価手法ワーキンググループ（WG）
リスク・安全性（RS）
核拡散抵抗性・核物質防護（PRPP）
経済性モデル（EM）
教育・訓練（ET）
タスクフォース（TF）
先進製造・材料工学（AMME）
R&Dインフラストラクチャー（RD）
原子力エネルギーの非電力利用（NEaNH）
システム運営委員会（SSC）
ナトリウム冷却高速炉（SFR）
超高温ガス炉（VHTR）
超臨界圧水冷却炉（SCWR）
ガス冷却高速炉（GFR）
鉛冷却高速炉（LFR）
溶融塩炉（MSR）
プロジェクト管理委員会（PMB）
システム統合・評価（SIA）
先進燃料（AF）
安全・運転性（SO）
機器・BOP（CD・BOP）
燃料・燃料サイクル（FFC）
コード検証（CMV）
材料（MAT）
水素製造（HP）
（システム統合・評価：SIA）
熱流動・安全（TH）
水化学・材料（CM）
（システム統合・評価：SIA）
概念設計・安全（CDS）
（燃料・炉心材料：FC）

GIF Chair and Support Structure 2022~

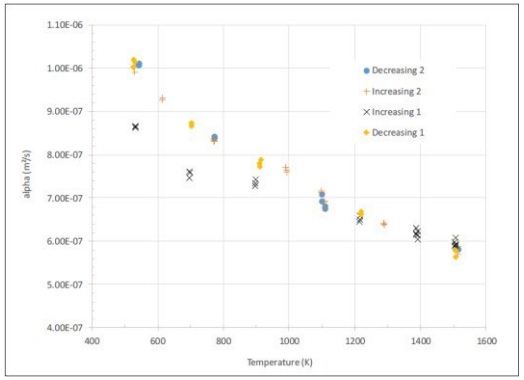


各炉システムの活動状況：Highlights related to SFR

- **Most active GIF system (together with VHTR) with four R&D Projects running:**
  - System Integration and Assessment (SIA)
  - Safety and Operations (S&O)
  - Advanced Fuel (AF)
  - Component Design and Balance of Plant (CD&BOP)
- **Five SFR Design Concepts:**
  - Loop Option (JSFR Design Track)
  - Pool Option (KALIMER-600, ESFR, and BN1200 Design Tracks)
  - Small Modular Option (SMFR-ANL Design Track)
- Revision of **SFR System Research Plan** was completed and approved by System Steering Committee in October 2019
- **White Paper on the SFR PRPP aspects** has been finalised and transmitted to EG
- **World**: Construction of two pilot SFR units (CFR-600) is ongoing in China
- **Europe**: Euratom collaborative project **ESFR-SMART** focuses on enhancing the safety of Generation-IV SFRs

Construction site of CFR-600

ESFR-SMART
sodium fast reactor safety



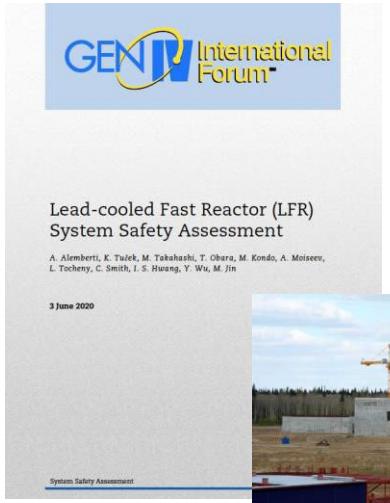
Thermal diffusivity measurements of $(U,Am)O_{2-x}$ at JRC Karlsruhe

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_95916/gif-sfr-safetyassessment-20170427-final
https://world-nuclear-news.org/Articles/China-starts-building-second-CFR-600-fast-reactor
http://esfr-smart.eu/

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

Highlights related to LFR and HLM technology

- Withing GIF, LFR members work under the framework of MoU
- Activities concentrate on the development of top-level reports
  - **LFR System Safety Assessment (SSA)** was published in June 2020
  - **White Paper on the LFR PRPP aspects** has been finalised in cooperation with GIF PRPPWG and transmitted to EG
  - **LFR Safety Design Criteria (SDC)** document is being prepared in collaboration with GIF RSWG, and is expected to be finalised and transmitted to GIF Expert Group in early 2021
- **World**: The licensing of the BREST LFR research demonstrator is currently being completed with site preparations ongoing in Tomsk, Russian Federation
- **Europe**: Two main projects: (i) **MYRRHA** R&D infrastructure (ADS demonstrator) under construction in Belgium; and (ii) LFR demonstrator **ALFRED** in Romania. Euratom collaborative projects supporting LFR- and heavy liquid metal (HLM)- R&D activities: **GEMMA, PATRICIA** and **PASCAL**



Site preparations for the BREST-OD-300 construction

GEMMA

PATRICIA

PASCAL

https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2020-06/gif_lfr_ssa_june_2020_2020-06-09_17-26-41_202.pdf
https://www.riatomsk.ru/article/20201109/seversk-brest-300-sroki/
http://www.eera-jpnm.eu/gemma/
https://patricia-h2020.eu/
https://cordis.europa.eu/project/id/847715
https://cordis.europa.eu/project/id/945341

Highlights related to VHTR

- **Four active VHTR "pre-competitive" Projects**
  - **Materials:** Graphite, metals, ceramics - corrosion, joining, irradiations
  - **Fuel:** Fabrication, characterisation, qualification, waste management
  - **Hydrogen Production:** Iodine-Sulphur (850°C), Copper-Chlorine (530°C), High temperature electrolysis (650°C)
  - **Computer Tools for Design and Licensing:** Thermal-hydraulic analysis (CFD), Neutronics and nuclear cross-section data, Radioisotope chemistry and transport, Reactor and plant dynamics
- Development of **VHTR Safety Design Criteria** on the basis of IAEA TECDOC and in cooperation with RSWG
- **World:** Construction of HTR-PM HTR demonstration plant is ongoing in China
- **Europe**: Euratom collaboration project **GEMINI+** project is ongoing, in which partners are working together towards the demonstration of high temperature nuclear cogeneration with an HTR in Poland – cf. presentation of D. Hittner (NC2I) and M. Fütterer (JRC) in Session 5

Construction site of HTR-PM

GEMINI+

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_103659/gifvhtr-safety-assessment-finaldec2018
https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Cold-testing-of-HTR-PM-reactors-completed
https://htr2020.org
http://www.gemini-initiative.com/geminiplus/

Highlights related to MSR

- A large interest around the MSR technology, with more than 40 concepts of a large variety being developed worldwide
- Within GIF, the MSR system is currently ongoing transition from Memorandum of Understanding (MoU) to **System Arrangement** (SA)
- Three (3) **Project Arrangements** are under development:
  - Fuel and coolant salt properties
  - Materials and components
  - System integration and cross-cutting issues
- Safety aspects have been identified as a key driver for the R&D Roadmap → ongoing interactions with GIF RSWG to create Task Force on the **MSR safety approach**
- **World**: Prototype MSR - TMSR-LF1 - is under construction in China
- **Europe**: Euratom collaborative project **SAMOSAFER** focuses on development of DiD approaches, development of theoretical models for safety-relevant phenomena, as well as related experimental setups

https://samosafer.eu/

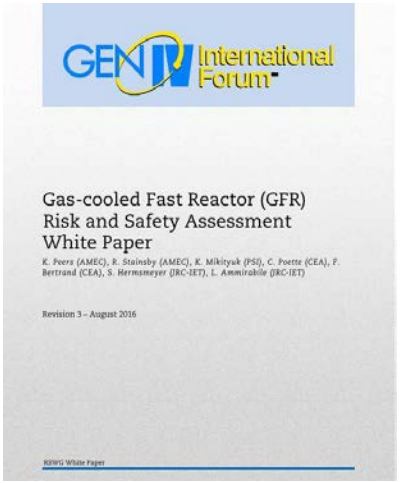
TMSR-LF1

SAMOSAFER

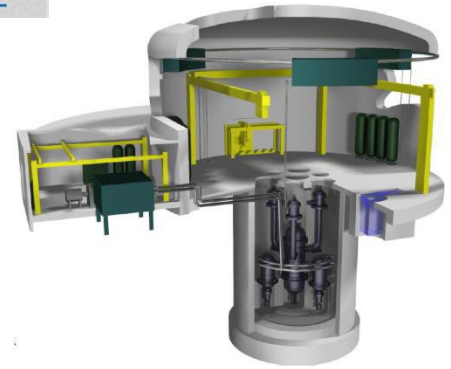
Successful synthesis of UCl_4 at JRC Karlsruhe

Highlights related to GFR

- GFR System Arrangement signed by Euratom, France, and Japan
  - Existing **Project Arrangement** on Conceptual Design and Safety
  - Provisional project on Fuel and core materials
  - Proposed project on GFR Technology
- Development of **GFR reference documents**
  - GFR Risk and Safety Assessment White Paper (completed in 2016)
  - GFR System Safety Assessment (draft)
  - GFR Safety Design Criteria (draft)
- **Europe**: The main project **ALLEGRO** - preparatory phase is carried out by the V4G4 Centre of Excellence. The work is being supported by the Euratom collaborative project **SafeG**, among others aiming at:
  - strengthening of inherent safety
  - resolving remaining open questions in residual heat removal in accident conditions



ALLEGRO concept

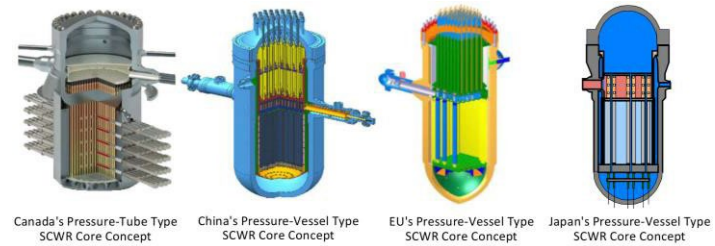


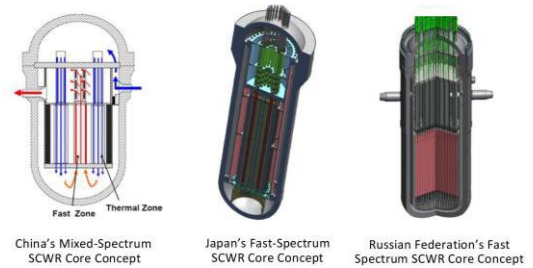
https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2016-10/rswg_gfr_white_paper_final_2016.pdf

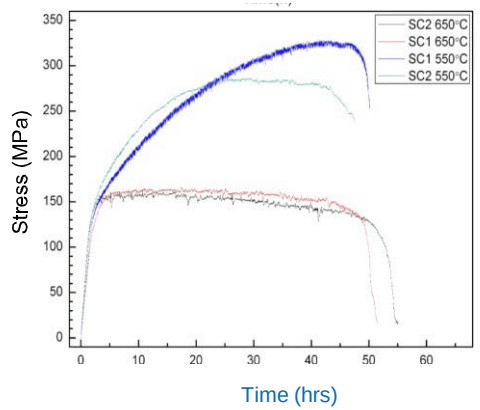
https://cordis.europa.eu/project/id/945041

Highlights related to SCWR

- **Two R&D Project arrangements established (currently being extended):**
  - Materials and Chemistry (2010)
  - Thermal-Hydraulics and Safety (2009)
- Provisional project on System Integration and Assessment
- Within GIF, four SCWR core concepts with **thermal spectrum** and three other core concepts with **mixed or fast spectrum** have been proposed
- **Europe**: Joint Euratom-China-Canada project **ECC-SMART** has just started. It aims at the assessment of the feasibility and identification of safety features of an intrinsically and passively safe SMR cooled by supercritical water – cf. subsequent presentation of Markéta Krýková (CV Řež) in this session
- **10th International Symposium on SCWRs**
  - Scheduled in March 2021
  - Will be organized as videoconference or webinar





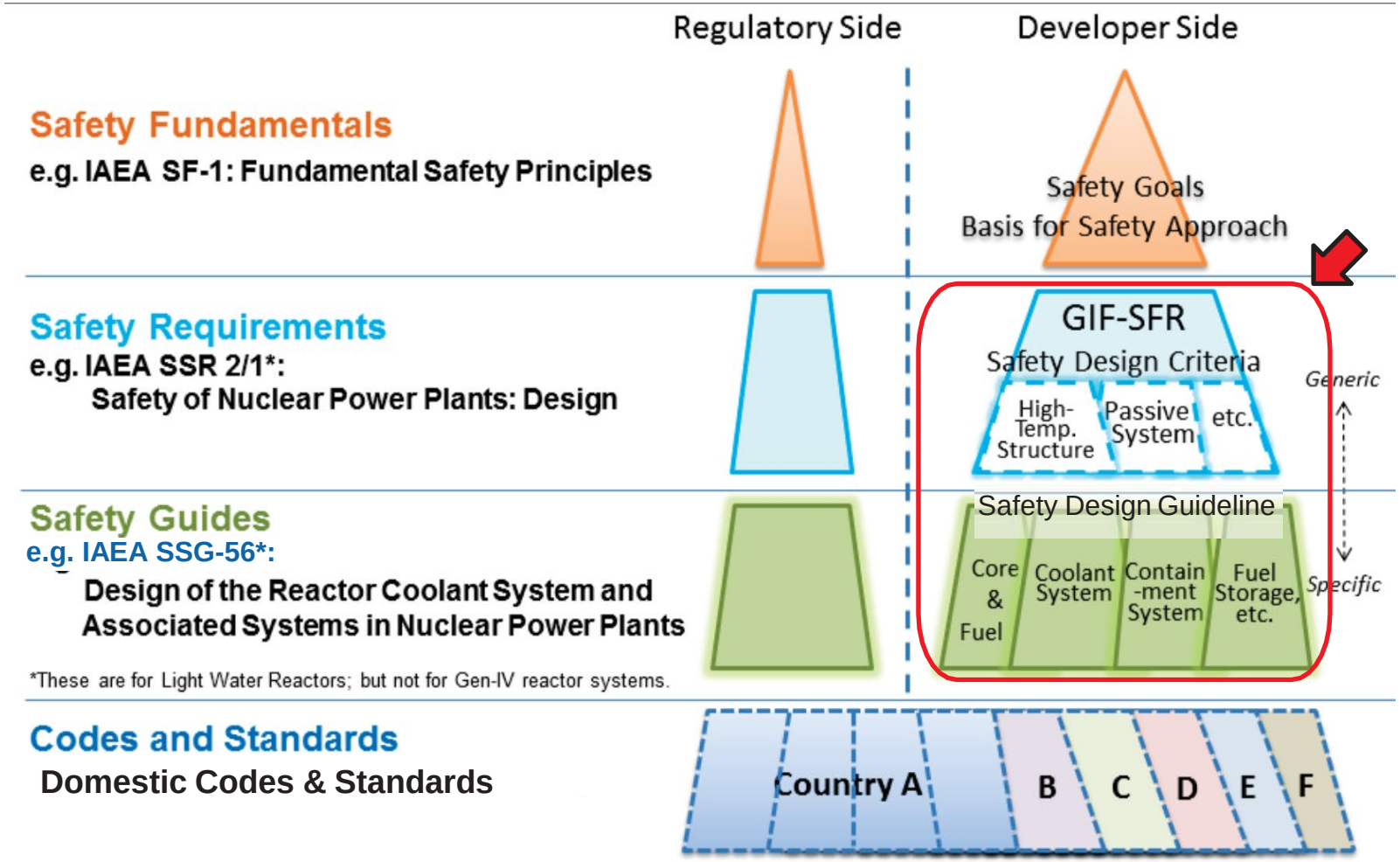


Measurement of stress corrosion cracking in the SCW conditions at JRC Petten

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_103619/gif-scwr-safetyassessment-finaldec2018
https://cordis.europa.eu/project/id/945234

第4世代炉の安全設計基準の構築と世界標準化

Safety Design Criteria and Guideline of Sodium cooled Fast Reactor*



- SFR Safety Design Criteria (SDC) development was proposed at GIF Policy Group in 2010
  - Realization of enhanced safety designs common to SFR systems,
  - Preparation for the forthcoming licensing in the near future
- SDC was formulated in 2013, external review and update
  - IAEA
  - OECD/NEA WGSAR
  - Regulatory bodies in SFR developing countries
- Safety design guidelines (SDG) for GIF SFR started in 2013.

* https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

安全設計基準にかかるGIFの成果物と適用炉型の拡大

- SDC/SDG are extended to the other reactor systems.

	White Paper on ISAM Implement.	System Safety Assessment	Safety Design Criteria/Guidelines*
SFR	Completed	Completed https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9366/risk-safety	SDC-Completed 1st SDG-Completed 2nd SDG-under review
VHTR	Completed	Completed	GIF is observing IAEA-CRP for SDC
LFR	Completed	Completed	SDC-under preparation SDC Report submitted to IAEA for review in 2021
SCWR	Completed	Completed	Not needed
GFR	Completed	Completed	SDC-under preparation
MSR	Under preparation	Under preparation	Under planning

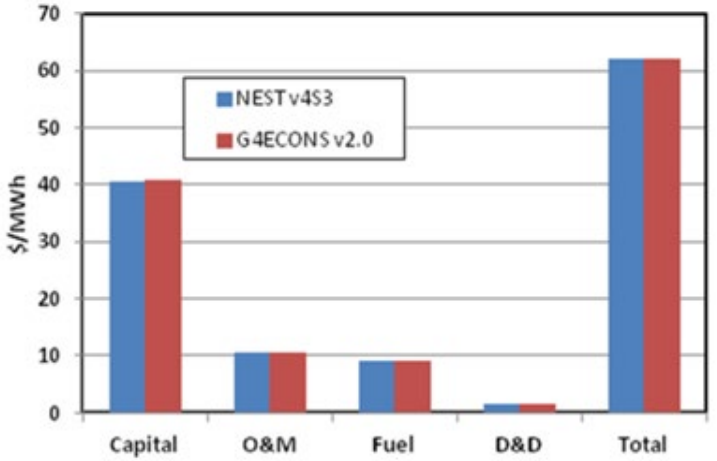
* https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria

手法開発WG

EMWG – Economics Modelling WG

- だれでも利用できる第４世代炉の経済性評価ができる G4ECONS手法を開発。
- 第４世代炉の コスト評価、コストアップ要因の特定に使える評価ガイドライン
- コスト削減とファイナンスにかかる検討, ESGの視点

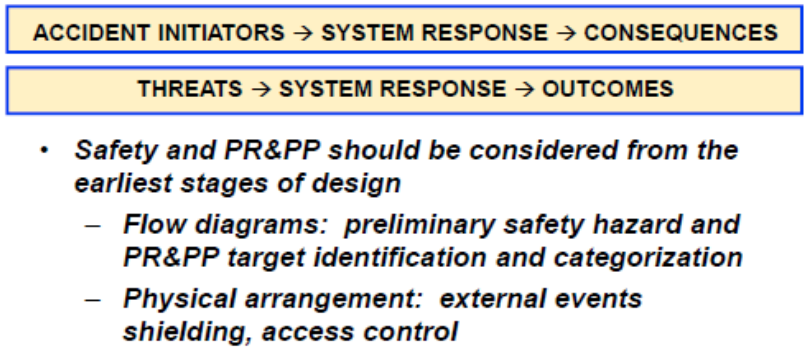
https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9364/economics for “Cost Estimating Guidelines”, “Impact of Increasing Share of Renewables”, and "Nuclear Energy: An ESG Investable Asset Class"



Benchmarking (G4ECONS vs. IAEA NEST)

PRPPWG – Proliferation Resistance and Physical Protection WG

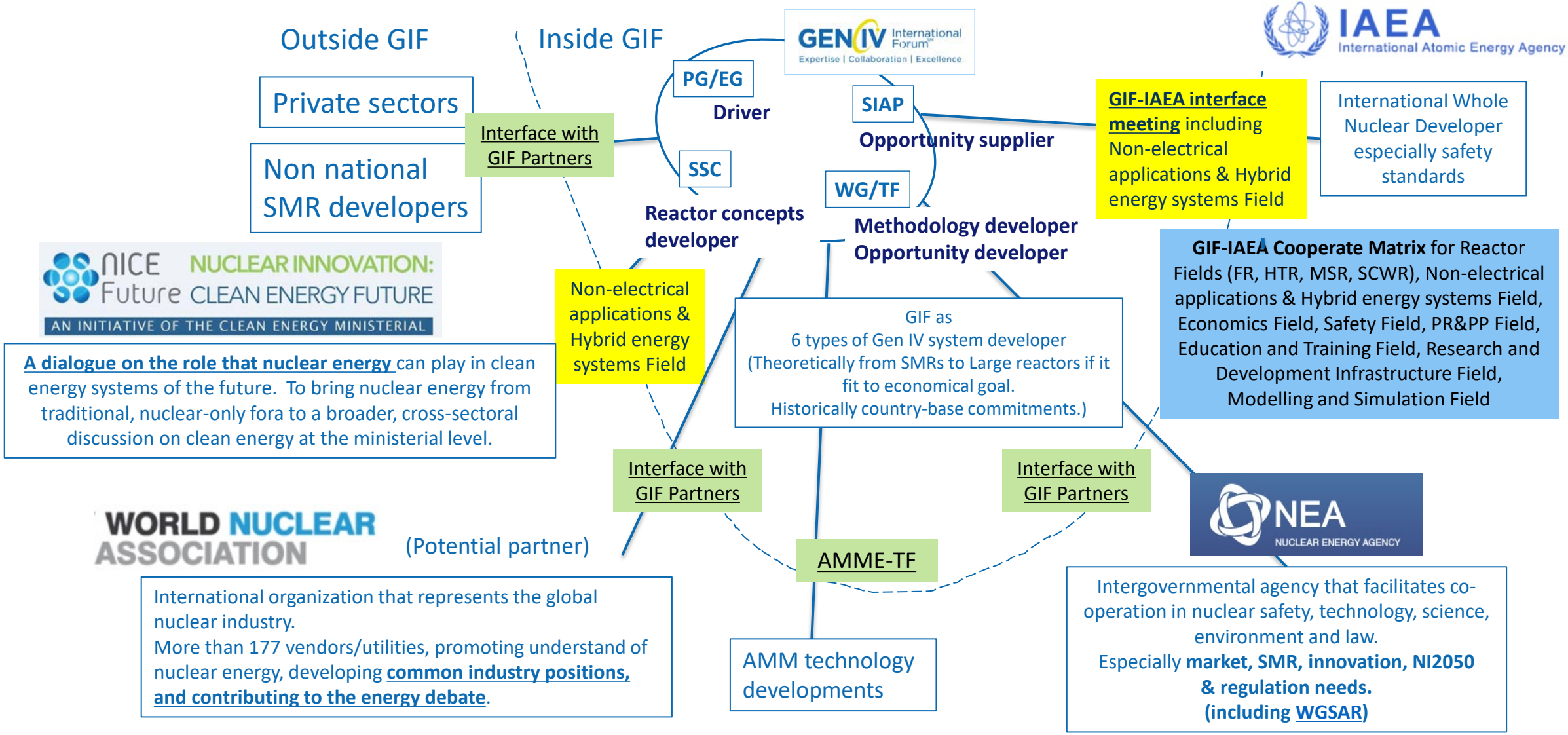
- 炉の設計の初期段階で使える、PRPP特性を評価、向上させる手法を開発。
- 各炉システムの運営委員会と協力してPRPP白書を作成



GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

See: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9365/pr-pp
Including “Evaluation Methodology Report”, “Workshop materials” & “Case Study Report of ESFR”

外部機関との連携による活動強化



CEM: NICE Future との連携

❑国レベルへのアプローチ:
Clean Energy Ministerial (CEM)

- ➢ NICE Future Initiative (Nuclear Innovation: Clean Energy Future)
  - ❖ CEM10: Breakthroughs event-Panel (Vancouver, 2019)
  - ❖ Report: Flexible Nuclear Energy for Clean Energy Systems (2020)
    - 13 Generation IV International Forum: Delivering Next Generation Nuclear Systems
  - ❖ Booklet: Pathways to net zero using nuclear innovation (2021)

GIFからのメッセージ：

- 第4世代炉は、高温システムの特性を生かし、高いフレキシビリティーをもって脱炭素社会に貢献できる。

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

IAEAとの連携

❑ GIF-IAEA Interface meeting

- 2021 July: The IAEA and the Generation IV International Forum (GIF) have agreed to expand their cooperation to include areas in the field of integrated energy systems, nuclear heat applications and hydrogen production, and advanced manufacturing. (IAEA Website news)

❑ GIF-IAEA LMFR safety workshop

- Review of SFR SDC/ SDG and LFR SDC by IAEA

❑ IAEA Conferences

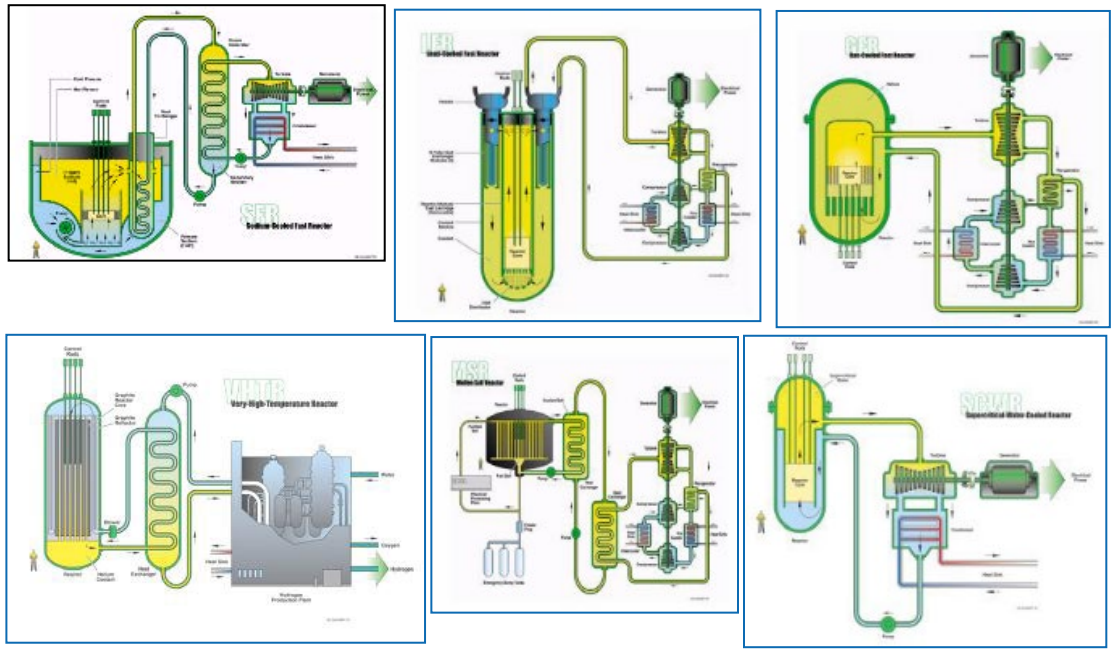
- Climate Change and the Role of Nuclear Power, 2019
- General Conference, Scientific Forum 2020

https://www.iaea.org/about/governance/general-conference/gc64/scientific-forum/programme

GIFの新しい取り組み：市場ニーズへの適合

新型炉の柔軟性、非電力利用のTF活動：Non-electric Application of Nuclear Heat

Reactor Types



SFR, LFR, GFR
VHTR, SCWR, MSR

x

Reactor Size

Power Reactor
SMR
Micro Reactor

x

Applications

- ✓ Cogeneration application
- ✓ Hydrogen production
- ✓ Seawater Desalination
- ✓ Process heat
- ✓ Synthetic Fuel and Chemicals
- ✓ Cooling application

Matrix of 6 x 3 x 6

IAEA Source

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

GIFの新しい取り組み：民間との協力拡大

先進製造技術と新材料 (Advanced Manufacturing and Material Engineering)

- 先進製造技術 (AMME) はSMRベンダーなど民間との協力のキー
  - 安全性と経済性（建設、運転、保守、検査）の革新
  - 人工知能（AI）の適用 も重要な要素
- AMMEにかかるWorkshop：2020年2月、2021年11月
  - 電力、SMRベンダー、規制機関、国立研究所などから参加
- AMME-TF の立ち上げ：民間との連携を含めてキーとなる活動に。
  - ニーズ調査
    - AMMEにかかる世界の急速な動きを捉え、参加機関・関係者のニーズを把握
  - 妥当性評価、実証、社会実装
    - 妥当性評価にかかる新しいアプローチ、手法の検討
      - ✓ 先進製造技術の適用にかかるキー技術
      - ✓ 妥当性評価において、異なる原子炉システムに共通する要因の摘出から着手する。
  - 設計とモデル化
    - 知見・経験の収集、共有、ベンチマークを通じて、収集と共有のニーズと成果の質を高める手法を合致させる。
- IAEAとの連携

Workshop

Small Group discussions

GIF 日本語版Webpage

https://gif.jaea.go.jp/

GIF Home > Mission > Governance Structure

第4世代原子力システム国際フォーラムについて

1. 第4世代原子力システム国際フォーラムとは

- 2030年代の商業導入を目指し、後述の開発目標の要件を満たす第4世代原子力システムの研究開発を多国間協力で推進することを目的に2001年7月に発足した**国際協力の枠組み**
- 2020年3月現在、13ケ国1機関（アルゼンチン、豪州、ブラジル、カナダ、フランス、日本、中国、韓国、南アフリカ、ロシア、スイス、英国及び米国及びユーラトム）が参加

2. 第4世代原子力システムとは

- 「第1世代」（初期の原型炉的な炉）、「第2世代」（現行の軽水炉等）、「第3世代」（改良型軽水炉、東電柏崎刈羽のABWR等）に続く、次世代の原子炉概念（図１）
- 次の**開発目標**の要件を具備する革新的原子炉システム。表１に示す**６システム**を2002年に選定。

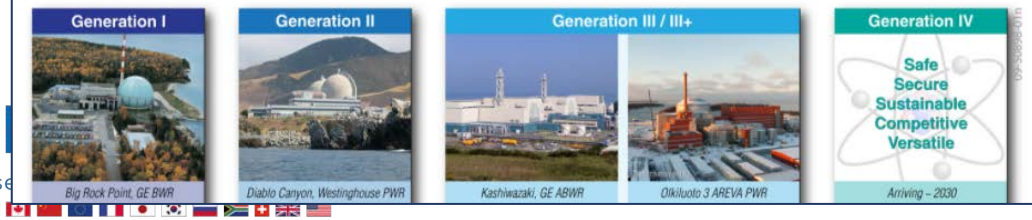
持続可能性
- 燃料の効率的利用
- 廃棄物の最小化と管理

安全性・信頼性
- 安全で信頼できる運転
- 炉心損傷の発生頻度が極めて低く炉心損傷程度も小さい
- 敷地外の緊急時対応不要

経済性
- 他のエネルギー源を凌駕するライフサイクル・コスト
- 他のエネルギープロジェクトと比肩する金融リスク

核拡散抵抗性・核物質防護
- 軍事転用の魅力度が低く盗取困難
- 耐テロ性

第4世代原子力システムに関し、よく聞かれる質問
第4世代原子力システムの利点



GIF Home > Publications > GIF ウェビナーガイド

GIF ウェビナーガイド

The Generation IV International Forumは、技術ウェビナー講座をおおよそ月1度の頻度で開催しております。 内容は、GIFにおいて、国際協力の形で開発を進めております次世代原子力システム、安全・経済性・燃料や流動といった各分野の技術紹介、 フェニックス、ロシアのBNシリーズ等の　既存炉の経験、HTR・MYRRHA・ALFRED・ASTRID等現在進行中のプロジェクトの紹介と多岐にわたっております。 これまでのウェビナー内容は、Youtubeにて英語字幕とともに下記から閲覧可能です。なお、今後のウェビナー情報は、GIFホームページ（NEA英語版）から、閲覧可能です。

1. Introduction (イントロダクション)
2. Safety and Regulation (安全性と規制)
3. Sustainability and Fuel Cycle (持続可能性及び燃料サイクル)
4. Generation IV System Design and Related Technology (第４世代原子炉のシステム設計及び関連技術)
4-1. Fast Reactors in Performance and Feasibility stages and related technology
(性能研究段階及び調査研究段階の高速炉及び関連技術)
4-2. Advanced Reactors with Specific motivations in Performance and Feasibility stages
(性能研究段階及び調査研究段階の先進炉)
5. Fuel / Core Design (炉心・燃料)
6. Operational Experience (運転経験)
7. Generation IV Cross Cutting Topics (横断的トピック/第４世代炉の評価技術/設計技術)
8. Webinars by winners of the Contest for young generation (EPiC)

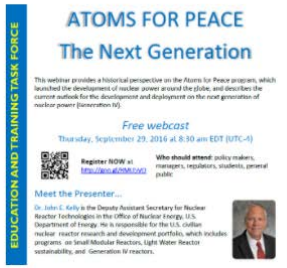
YouTubeにてGIFウェビナーを閲覧の際は、設定で字幕をオン（英語：自動生成）にしていただくと、英語字幕の表示が可能です。

1. Introduction (イントロダクション)

Atoms for Peace. The Next Generation
Presenter: Dr. John Kelly, Department of Energy, USA

【Atoms for Peaceプログラムから次世代原子力システムの開発へ向けて】
本ウェビナーでは、原子力の平和利用に関する歴史的展望を紹介します。Atoms for Peace programによって、原子力発電の世界的展開が始まりました。 歴史的展開に基づき、さらに現在進められている第４世代原子炉システムの開発と展開について紹介します。

Watch You-Tube | Presen. File | Webinar Flyer | Guide Book | Text Data



まとめ

- GIFの６炉型と開発目標
  - SFR, LFR, GFR, MSR, VHTR, SCWR
  - GIF Goals; Sustainability, Safety and Reliability, Economy, PRPP (Security)
- 安全設計要件と適用指針の策定に向けて
  - SFR and extended to Other reactor systems
  - Cooperation with IAEA, OECD/NEA , and Regulatory bodies in each country
- GIFの新しい活動、民間との連携
  - Non-electric Application of Nuclear Heat for Carbon Neutral
  - Advanced Manufacturing and Material Engineering with Private Sectors
- 連携強化と世界にむけての発信
  - Clean Energy Ministerial; NICE Future, IFNEC
  - IAEA, OECD/NEA, WNA,
  - Website Renewal, Webinar, GIF日本語版Website https://gif.jaea.go.jp/