



2020秋の大会企画セッション
「SMR等革新炉の安全と安全規制について—今後の取組—」
フォローアップセミナー

高温ガス炉に関する取組について —安全設計要件の検討など—

2021年1月19日

日本原子力研究開発機構
大橋 弘史

1. 高温ガス炉の概要
2. 国内における活動
3. 国際原子力機関（IAEA）における活動
4. 今後の取組
5. まとめ

高温ガス炉によるカーボンニュートラルへの貢献

高温ガス炉は「S+3E」のエネルギー政策の原則に応え、水素製造、工業熱利用などにより、カーボンニュートラル、脱炭素社会への社会構造変革（イノベーション）をもたらす革新的原子炉

高温ガス炉の特長

| 項目 | 高温ガス炉 | (参考) 軽水炉 |
|---------------|--|-------------------------------|
| 電気出力 (熱出力) | ~30万kW (SMR※) ~60万kW | 100万kW~ (大型主流) 3,00万kW~ |
| 原子炉出口温度 | 700℃~950℃ | 約300℃ |
| 用途 | 熱利用 (水素製造、 高温蒸気、海水淡水化、 地域暖房)、 発電 | 発電 |

※ SMR: Small Modular Reactor (小型モジュール炉)

安全性 (S)

- 炉心溶融しない等の高い安全性

エネルギー安定供給 (E)

- 原子力による水素エネルギーの安定供給

経済効率性 (E)

- 熱利用率：約80%
- 発電効率：約50%
- 燃料の高燃焼度化 (120GWd/t)

環境適合性 (E)

- 軽水炉の1/4程度の使用済燃料発生量
- 炭酸ガス排出量の大幅削減へ貢献

高温ガス炉によるイノベーション創出

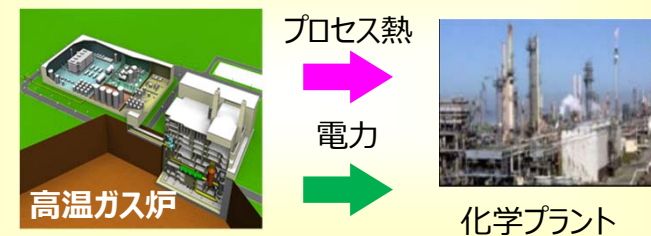
カーボンニュートラル、脱炭素社会

高温ガス炉導入により、約20%の地球温暖化ガスの放出削減削減 (2013年度比) に貢献

水素製造 (水素電力コジェネ)



工業熱利用



再エネとのハイブリッド



高温ガス炉の優れた安全性

| 項目 | 高温ガス炉 | (参考) 軽水炉 |
|--------|--------------|------------------|
| 燃料型式 | セラミックス被覆燃料粒子 | 金属 (ジルカロイ) 被覆燃料棒 |
| 原子炉冷却材 | ヘリウムガス | 軽水 |
| 減速材 | 黒鉛 | 軽水 |

セラミックス被覆燃料粒子

耐熱性が高く燃料溶融しない

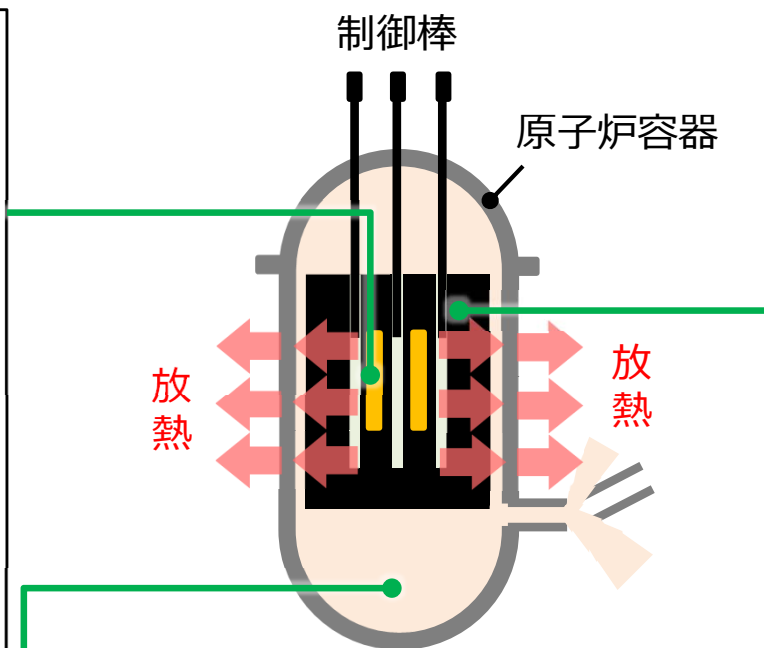
燃料核 セラミックス被覆

1600°Cを超える 2000°Cでもほとんど破損しない

被覆燃料を加熱した実験結果

ヘリウムガス冷却材

化学反応、蒸発しないため
水素・水蒸気爆発が発生しない



電源や冷却材の喪失時に
制御棒を挿入しなくても
自然に止まり、冷え、
放射性物質が閉じ込められる

HTTR建設時の安全設計方針には、
その良さが必ずしも反映できていない

黒鉛減速材 (炉心構造材)

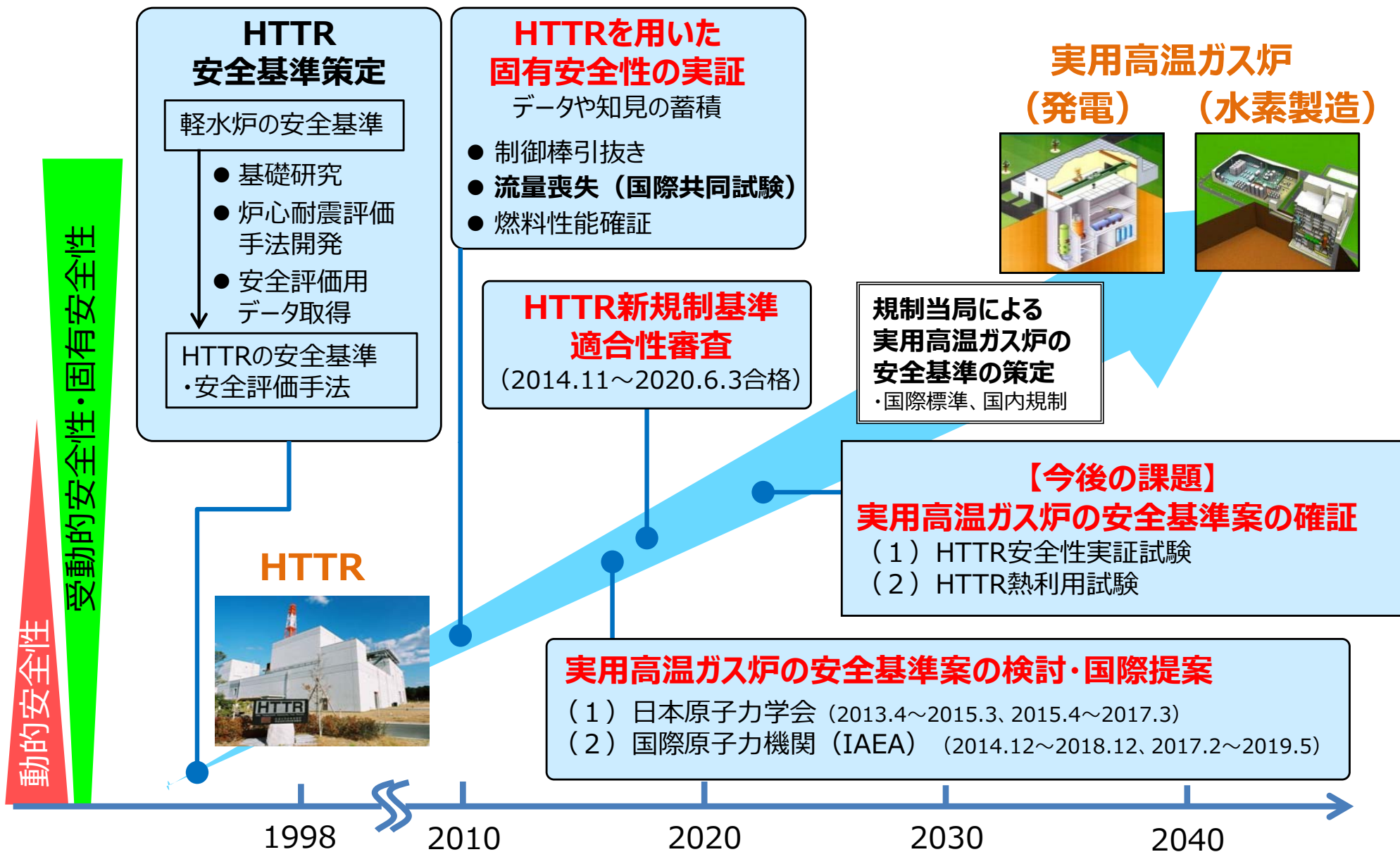
大熱容量・高熱伝導のため燃料の
温度上昇が緩やかで原子炉容器
外側での放熱で燃料が冷える

燃料ピン 燃料ブロック

事故が発生しても
短時間で対応する必要がない
許容設計限界 (1600°C)

1週間程度

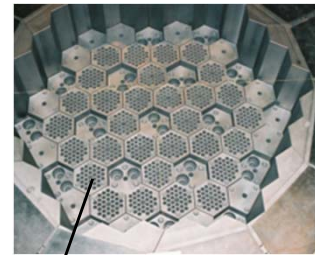
冷却材喪失時の燃料温度 (解析結果)



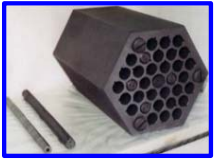
高温工学試験研究炉 (HTTR)



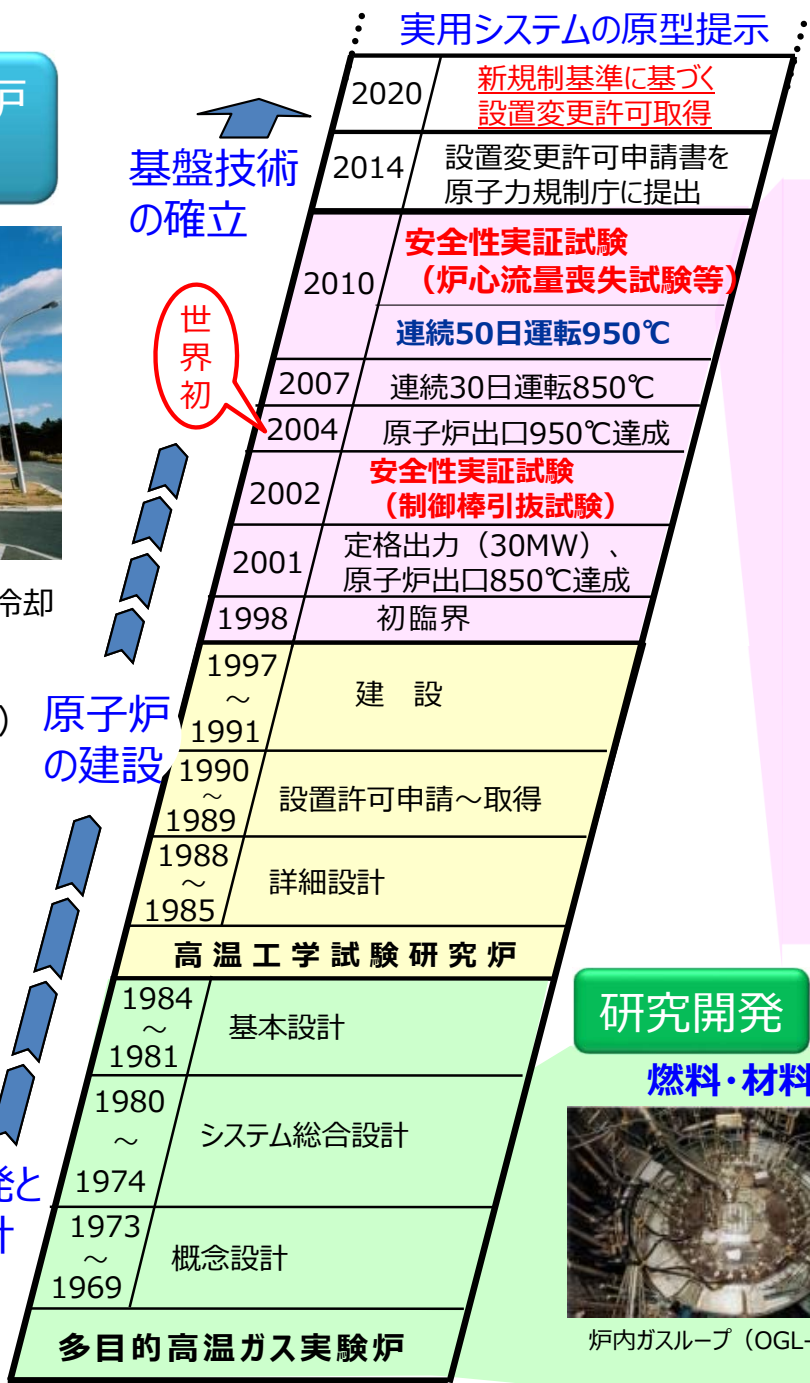
我が国初の黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉（高温ガス炉）
 熱出力：30 MW
 原子炉出口温度：950℃(最高)
 一次冷却材圧力：4.0 MPa



炉心の中心部



炉心の黒鉛ブロック



安全性実証試験

OECD/NEAの国際共同試験

海外の規制機関、規制支援機関、研究機関が参加※



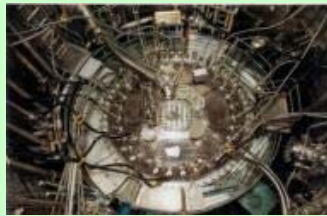
日本 米 仏 独 韓 チェコ ハンガリー

- 高温ガス炉の固有の安全性を実証
- 取得したデータや知見をもとに、安全基準の国際標準化を目指す

※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）

研究開発

燃料・材料



炉内ガスループ (OGL-1)

炉物理



高温ガス炉臨界実験装置 (VHTRC)

熱流動



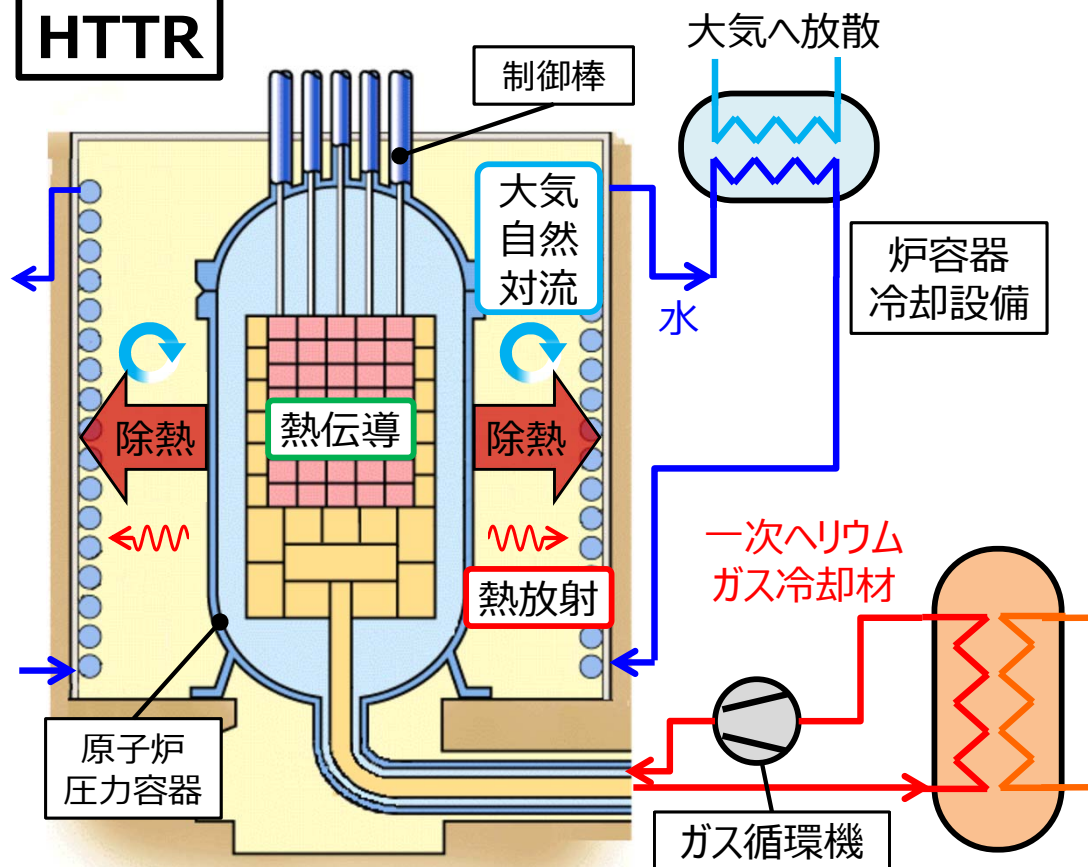
大型構造機器実証試験ループ (HENDEL)

HTTRによる実証 -自然に止まる、自然に冷える-

試験計画

- 30%出力 (9MW) **炉心冷却流量喪失試験**
(ガス循環機停止) ... **完了!** (平成22年度)
- 80%, 100%出力 **炉心冷却流量喪失試験**
(ガス循環機停止) ... 実施予定
- 30%出力 **炉心 + 炉容器冷却流量喪失試験**
(ガス循環機 + 炉容器冷却設備停止) ... 実施予定

HTTR

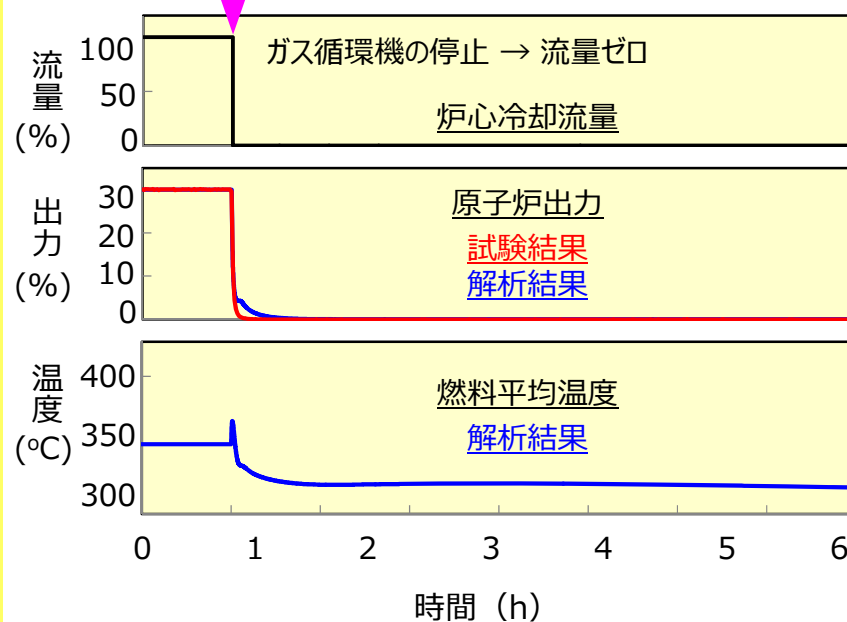


試験条件

- 初期出力30% (9MW)
- 炉心冷却流量の停止
- 炉容器冷却設備の運転継続
- 停止操作 (制御棒挿入) なし

試験結果

制御棒の挿入、炉心の強制冷却を行わなくても、物理現象のみで、原子炉が自然に静定・冷却されることを確認



「高温ガス炉の安全設計方針」 研究専門委員会（2013.4～2015.3）

【目的】 IAEAへ提案する実用高温
ガス炉の安全要件案の作成

高温ガス炉の固有の安全特性

HTTRなどを用いた実証データ

高温ガス炉における
安全確保のアプローチ

OPT法※
具体化

安全原則
Safety
Fundamental

安全要件
Safety
Requirements

「プリズマティック型高温ガス炉 の安全設計プロセス」 研究専門委員会（2015.4～2017.3）

【目的】 安全要件と安全指針
をつなぐ考え方の構築

【安全設計プロセス】

安全設計

- 安全要件を達成する
ための設計事項
- 設計基準事象
- 許容基準

システム設計

具体化

具体化

提案

国際原子力機関（IAEA）

- 協力研究計画（CRP）
（2014.12～2018.12）
- SMRへの適用性評価
（2017.2～2019.5）

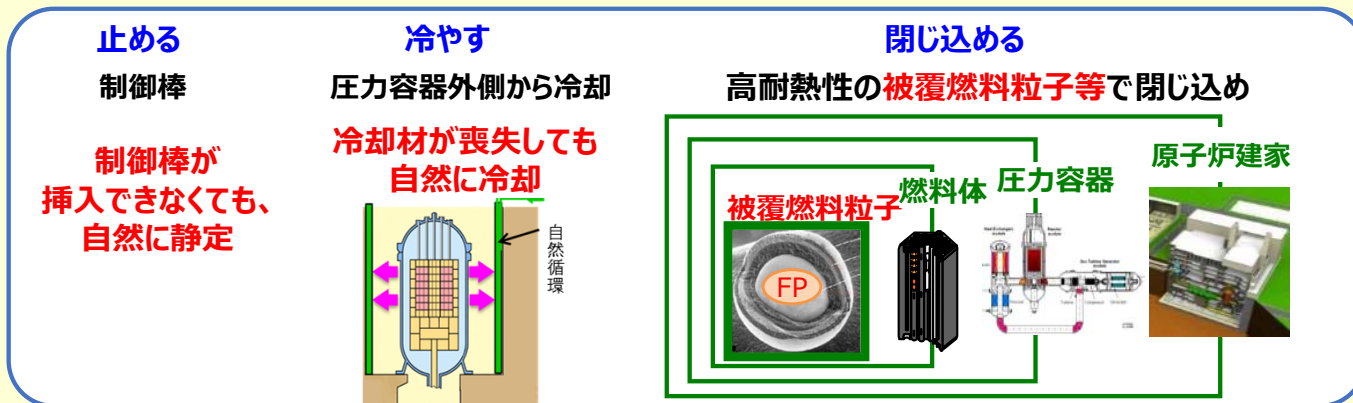
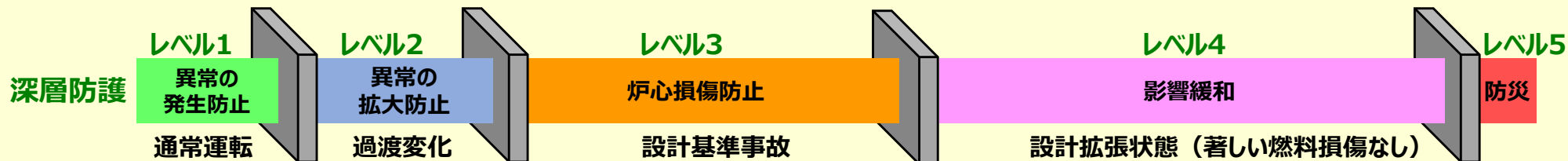
安全指針
Safety Guides

IAEAの安全基準体系

安全要件の検討 -安全確保のアプローチ-

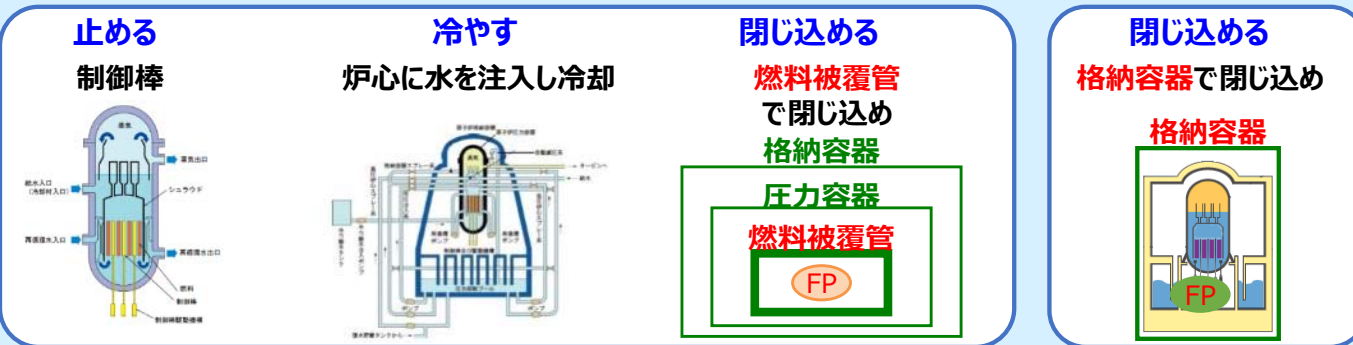
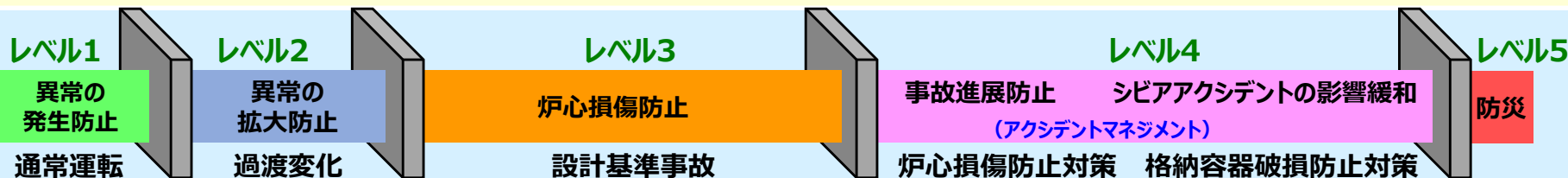
高温ガス炉

- 炉心（燃料）の著しい損傷を起こさないように設計
- 事故時に、燃料（被覆燃料粒子）、コンファインメントなどで放射性物質を閉じ込め
- 固有の安全性と受動的安全設備による安全確保（能動的な安全設備なし、動力用電源不要）



軽水炉

深層防護



| 安全要件の項目 | | 高温ガス炉 | 軽水炉 |
|----------------------|------------|---|--|
| 設計拡張状態 | | <ul style="list-style-type: none"> DEC : 著しい燃料損傷なし | <ul style="list-style-type: none"> DEC-A : 著しい燃料損傷なし DEC-B : 炉心溶融 |
| 原子炉の停止 | | <ul style="list-style-type: none"> 原理の異なる2つの手段 (固有の炉停止特性が手段の1つ) | <ul style="list-style-type: none"> 原理の異なる独立2系統 |
| 事故時の炉心除熱 | | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器の外面からの受動的な残留熱除去 (受動的な炉心の間接冷却) | <ul style="list-style-type: none"> 非常用炉心冷却 (能動的な炉心の強制冷却) |
| 放射性物質 閉じ込め | 燃料 | <ul style="list-style-type: none"> 通常運転時、過渡変化時及び事故時の閉じ込め性能維持 (事故時も燃料で放射性物質を閉じ込め) | <ul style="list-style-type: none"> 通常運転時と過渡変化時の健全性維持 (事故時も健全性維持に努めるが、炉心溶融を想定) |
| | 原子炉 格納系 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉格納施設 (気密性 : 低) | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉格納容器 (気密性 : 高) |
| 外部電源喪失 に対する要求 | | <ul style="list-style-type: none"> プラントパラメータ監視、放射線モニタリング | <ul style="list-style-type: none"> 炉心溶融の影響緩和に必要な設備への電力供給 プラントパラメータ監視、放射線モニタリング |
| 事故時の水系隔離 に対する要求 | | <ul style="list-style-type: none"> 1次冷却システムへの水侵入抑制 | <ul style="list-style-type: none"> 冷却材喪失防止 |
| 事故時の格納施設隔離 に対する要求 | | <ul style="list-style-type: none"> 1次冷却システムへの空気侵入抑制 放射性物質の閉じ込め | <ul style="list-style-type: none"> 冷却材喪失防止 放射性物質の閉じ込め |

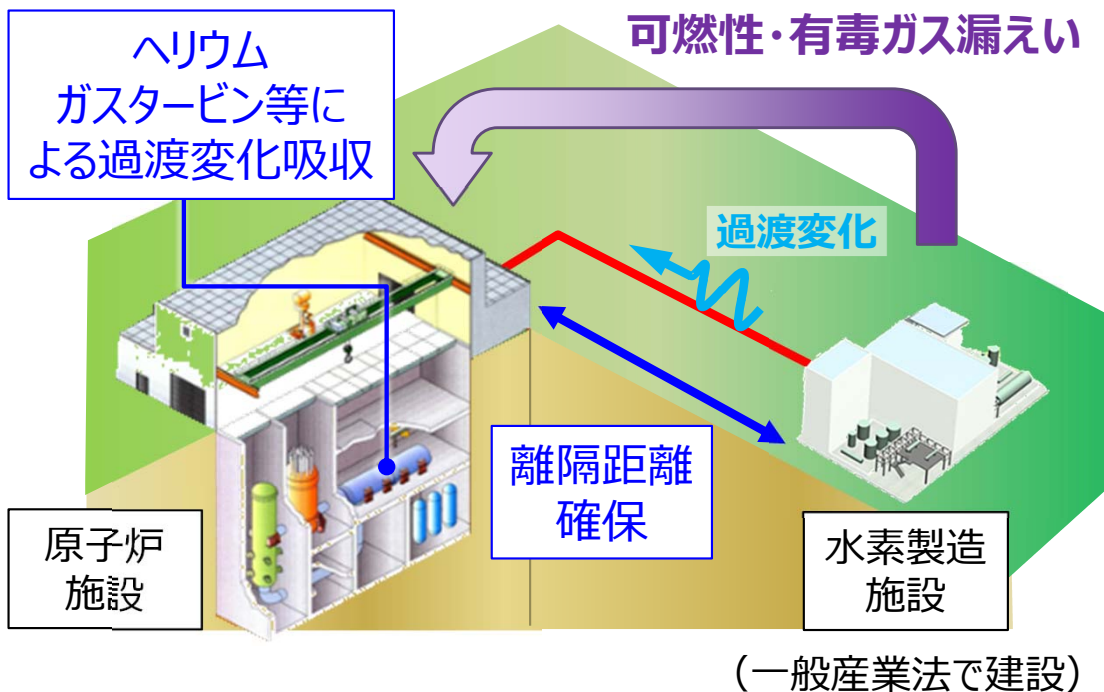
● 原子炉の安全確保

- 熱利用施設接続に伴い安全上考慮すべき事象に対して、原子炉施設の安全を確保

● 熱利用施設の一般産業化

- 一般産業界の参入を促すため、熱利用施設を一般産業法で設計、建設、運転

水素製造施設接続に伴い安全上考慮すべき事象



安全基準 (安全要件)

【原子炉の安全確保】 安全要件

可燃性・有毒ガス
漏えい時の原子炉
の安全性確保

【熱利用施設 の一般産業化】 一般産業化の条件

熱利用施設に
起因する過渡変化時の
原子炉安定運転維持

実用炉の設計対策

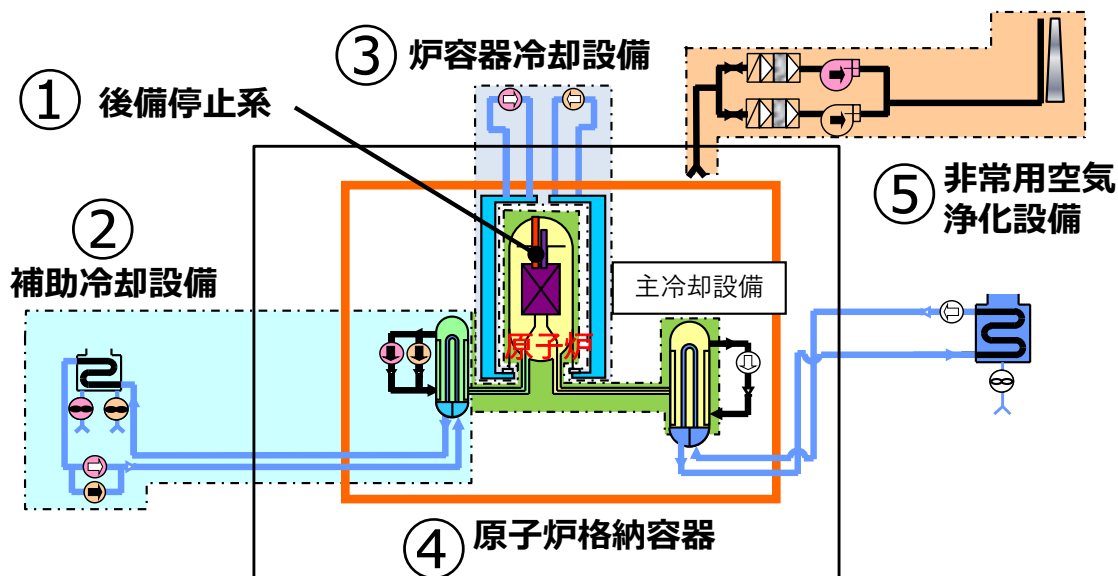
原子炉施設と
水素製造施設を隔離
(離隔距離確保等)

ヘリウムガスタービン等
による過渡変化吸収

審査での提案

固有の安全特性に基づく安全設備の重要度のダウングレード

| 安全機能 | HTTR建設時の安全設計方針 | 新規制基準適合性審査での提案 |
|-------|--------------------------|--|
| 止める | 主：制御棒系 副：後備停止系 | 主：制御棒系 副： 固有の炉停止特性 、①後備停止系 |
| 冷やす | 安全設備 (補助冷却設備、炉容器冷却設備) | 炉心からの自然放熱 安全設備 (②補助冷却設備、③炉容器冷却設備) |
| 閉じ込める | 安全設備 (原子炉格納容器等) | 被覆燃料粒子による閉じ込め 安全設備 (④原子炉格納容器、⑤非常用空気浄化設備) |



①～⑤の安全設備の重要度のダウングレードを提案

| 重要度分類 | HTTR建設時 | 新規制基準適合性審査での提案 |
|--------------|-------------|----------------|
| 安全上の機能別重要度分類 | MS-1 | MS-2 |
| 耐震設計上の重要度分類 | Sクラス | Bクラス |

審査の結果

重要度のダウングレードが承認

今後への期待

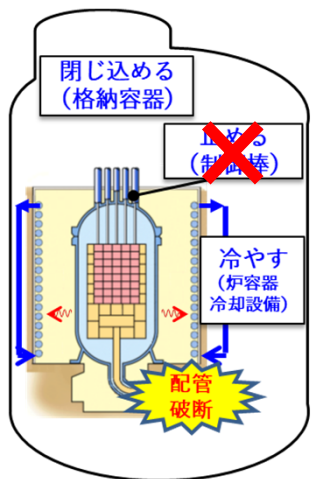
実用高温ガス炉の安全要件への固有の安全特性の取り込み

審査での提案

新たに審査へ追加されたBDBAにおいても、燃料溶融や炉心の著しい損傷が発生しない

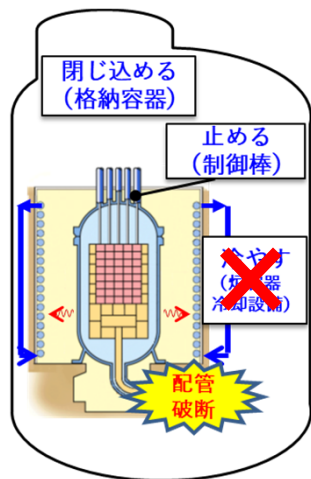
BDBAの想定

- 決定論的に、最も厳しい設計基準事故（1次系配管破断）発生時に安全設備の機能喪失を想定
- 加えて、自然現象（地震）による耐震Bクラス機器の機能喪失を想定



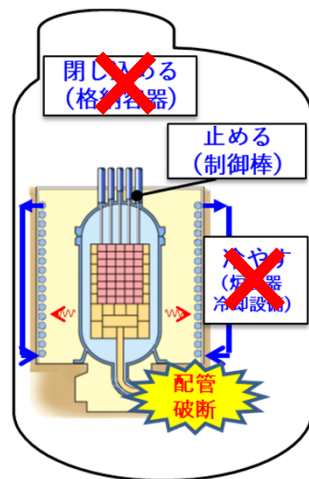
【想定事象1】

DBA+(停止機能喪失)



【想定事象2】

DBA+(冷却機能喪失)



【想定事象3】

DBA+(閉じ込め機能喪失)
+(冷却機能喪失*)
*地震による機能喪失



安全評価結果

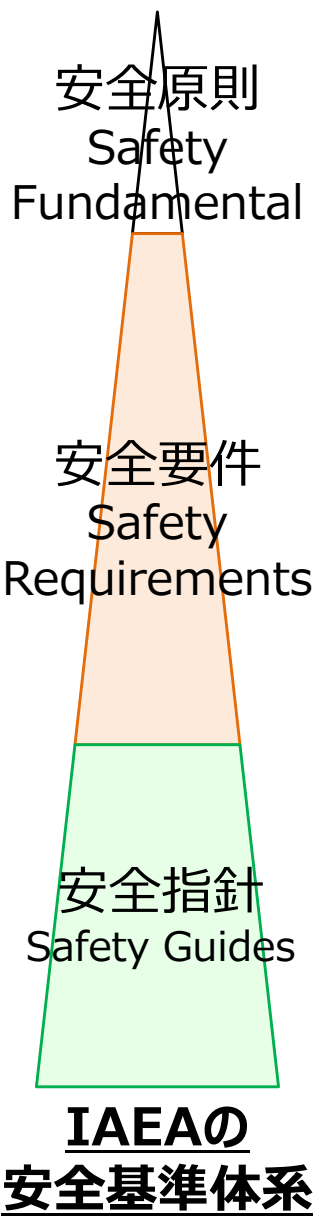
- 燃料最高温度は、許容設計限度温度（1600℃）を上回ることはなく、温度上昇による燃料損傷は生じない
- 炉心黒鉛の酸化量は、炉心の構造健全性維持の条件を満足
- 黒鉛酸化に伴い発生する可燃性ガス濃度は、燃焼範囲外
- 敷地境界における一般公衆の被ばく線量は、最大約 3 mSv

審査の結果

燃料溶融しない、黒鉛酸化等による炉心の著しい損傷が発生しない、大規模な放射性物質の放出がない、ことなどが承認

今後への期待

実用高温ガス炉の安全要件におけるDECの単一化



原子力安全・セキュリティー局

- IAEAが専門家を招集しコンサルタント会合を開催
- 技術報告書 (TECDOC又はSafety Report) を作成

SMR安全要件の開発手法

(2019.9~2020.2)

- 目的：テクノロジー・ニュートラルなSMR安全要件開発の方法論の検討
- 日本原子力学会での安全要件作成の知見を提示

安全設計要件のSMR適用性評価

(2017.2~2019.5)

- 目的：高温ガスSMRと軽水SMRへのSSR-2/1 (Rev.1) の適用性評価
- 日本原子力学会で作成した安全要件案を提案
- 技術報告書 (IAEA-TECDOC-1936) が2020年12月刊行



原子力エネルギー局

- IAEAが設立した協力研究計画 (CRP) へ各機関が参加申請
- 技術報告書 (TECDOC) を作成

研究協力計画 (CRP)

モジュラー型高温ガス炉の安全設計

(2014.12~2018.12)



- 目的：高温ガス炉の優れた安全上の特長を考慮した安全要件の国際標準案の検討
- 8か国から高温ガス炉専門家が参加
- 日本原子力学会で作成した安全要件案を提案
- 国際標準案を技術報告書として取り纏め

安全評価指針のSMR適用性評価

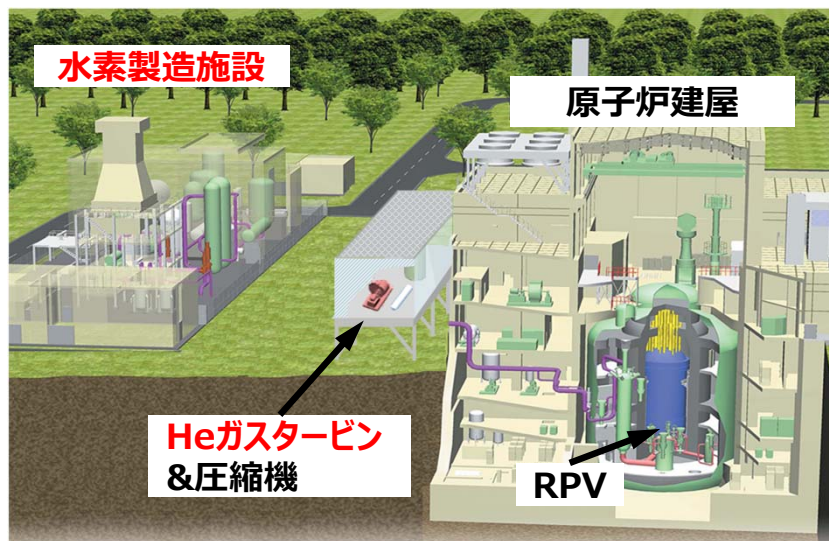
(2020.7~)

安全設計指針のSMR適用性評価

(2019.11~)

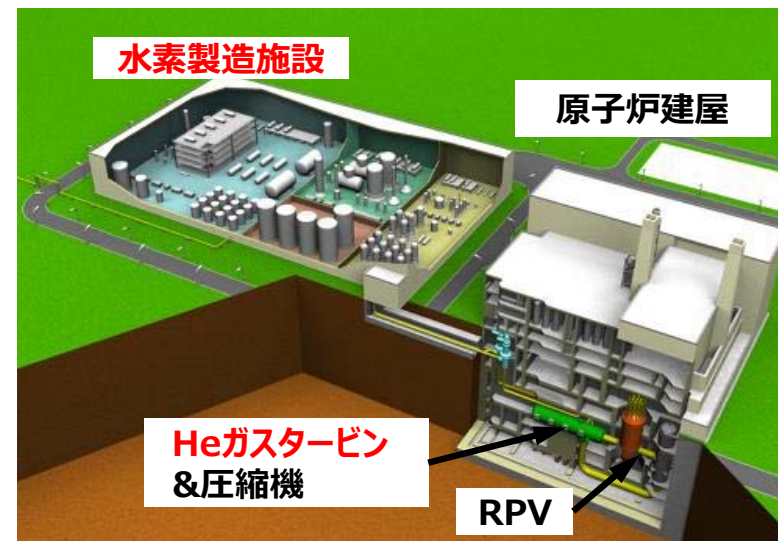
今後の取組 - HTTR熱利用試験 -

- 原子炉と水素製造施設の接続に係る安全基準策定への貢献
 - 水素製造施設の接続に係るHTTR原子炉設置変更許可申請において原子力規制委員会の審査を通じて許可基準やガイドラインの策定へ貢献
- 高温ガス炉から取出した熱を用いた水素製造やヘリウムガスタービン発電 (GT) の実証
 - 実用炉システム設計に基づき、HTTRに熱利用試験設備を追設し技術を実証



HTTR熱利用試験 (JAEA)

安全基準
熱利用技術



実用炉 (産業界)



- 原子力機構は、高温ガス炉によるカーボンニュートラル、脱炭素社会への貢献を目指し、実用高温ガス炉の社会実装に不可欠な安全基準の構築に資するため、国内外での活動に取り組んでいる
 - HTTRを用いた高温ガス炉の固有の安全性の実証、試験データや知見の蓄積
 - 日本原子力学会における検討
 - HTTR新規制基準適合性審査への知見の活用
 - 国際原子力機関（IAEA）における国際提案
- 今後は、IAEAでの活動を継続するとともに、以下の活動を推進する
 - 日本との国際協力によって高温ガス炉の導入を目指しているポーランドや英国の規制当局への提案（二国間国際協力）
 - 原子炉と水素製造施設の接続に係る安全基準の策定に資するHTTR熱利用試験