

CIGS エネルギー2050研究会 シンポジウム
地球温暖化問題に対する原子力開発の役割
ー高温ガス炉と廃棄物消滅処理についてー

高温ガス炉の現状と展望

2014年2月24日(月)

小川 益郎

日本原子力研究開発機構
原子力水素・熱利用研究センター

目次

1. 高温ガス炉の概要

2. 国内外の状況

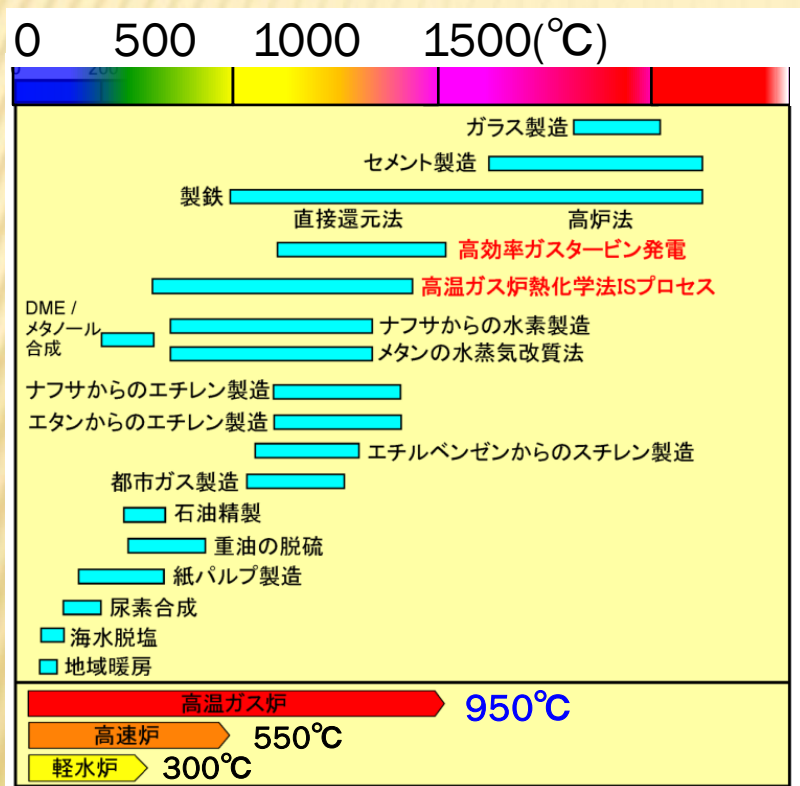
3. 社会からの要請への対応力

4. 展望

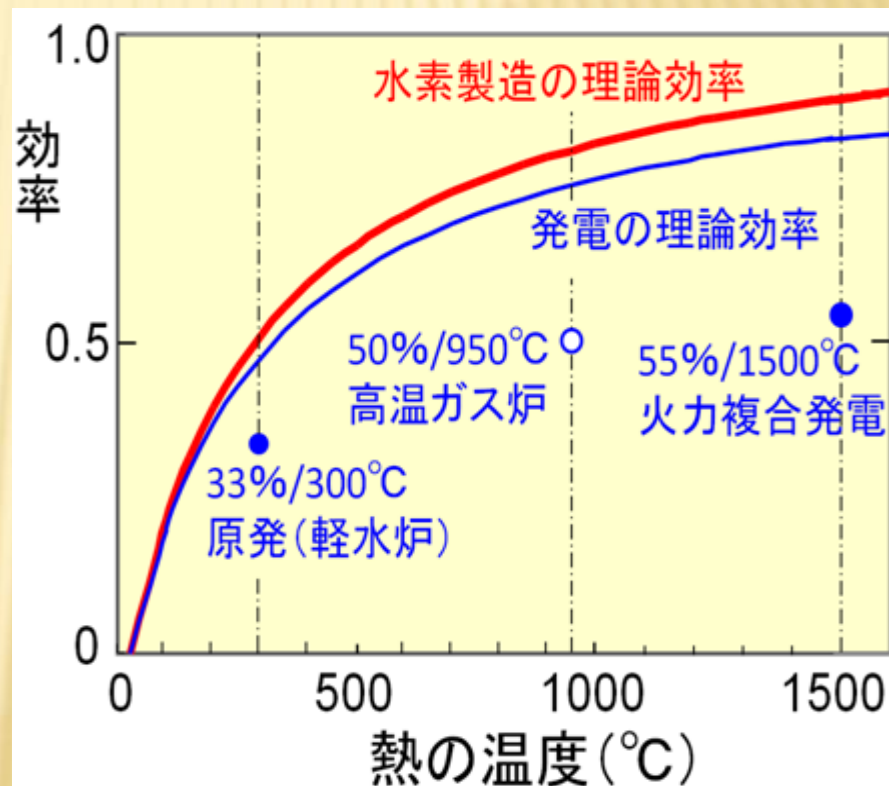
1. 高温ガス炉の概要

目的: 1000°Cに近い高温の熱を供給

➤ 産業における様々な熱利用



➤ 高温ほど、高効率でエネルギー変換



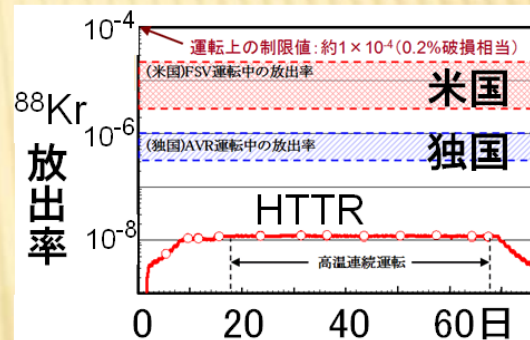
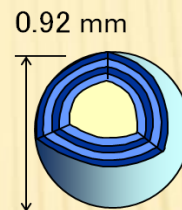
ヘリウム冷却、セラミック被覆、黒鉛減速、小型の炉

世界最先端、すべて国産技術

➤ セラミック被覆技術 : 1600°Cまで使用可

概要: セラミックで4重に被覆して、直径約1mmの粒子型燃料。

性能: 放射性物質の閉じ込め期間は、軽水炉の3倍弱。
閉じ込め能力は、米国・独国の100~1000倍。

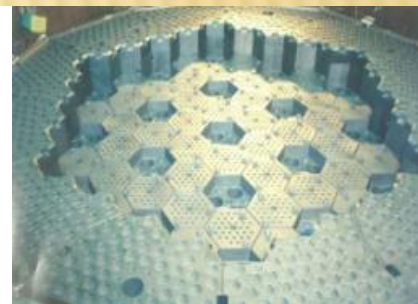


➤ 黒鉛等方化技術 : 2400°Cまで使用可

概要: 大型ブロックのすべての方向に、同じ特性。

性能: 優れた強度、熱伝導、耐照射性。燃えない。

黒鉛炉心



➤ 耐熱金属・高温構造技術 : 1000°Cまで使用可

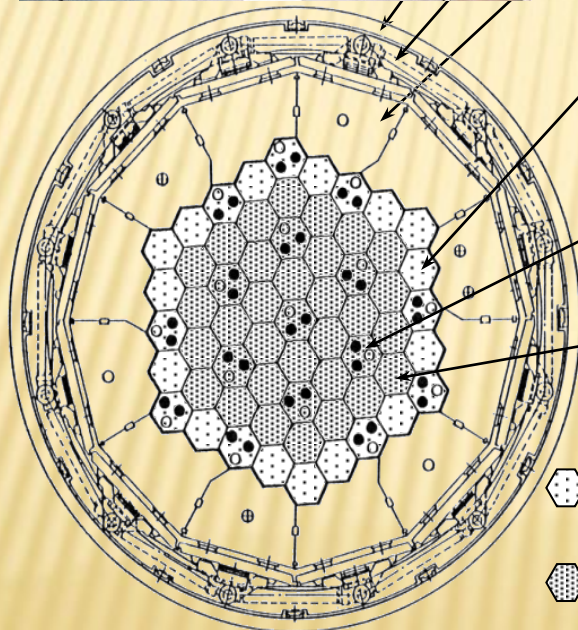
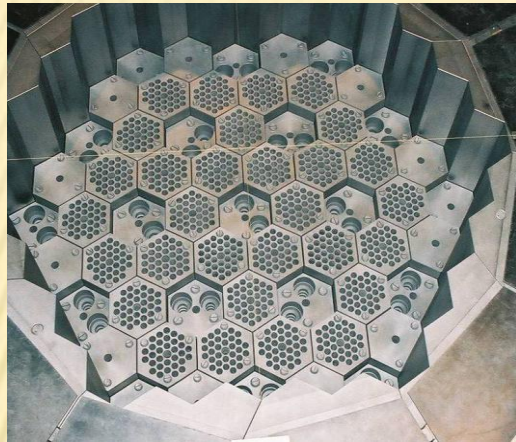
概要: 耐熱・耐酸化ニッケル系超合金。

性能: 優れた断熱性、熱伸吸収性、防振性、耐圧性を有し、冷却せずに使用できる世界最高温度を達成。

高温熱交換器



高温ガス炉 HTTR の構造



原子炉
圧力容器

側部遮蔽体

固定反射体
ブロック

可動反射体
ブロック

制御棒案内
ブロック

燃料ブロック

可動反射
体領域

燃料領域

熱出力 : 30MW
出口温度 : 950°C

スタンドパイプ
上部遮蔽体

炉心抑制機構

ホットプレナム
ブロック

サポートポスト

下部プレナム
ブロック

サポートプレート

炉心支持板

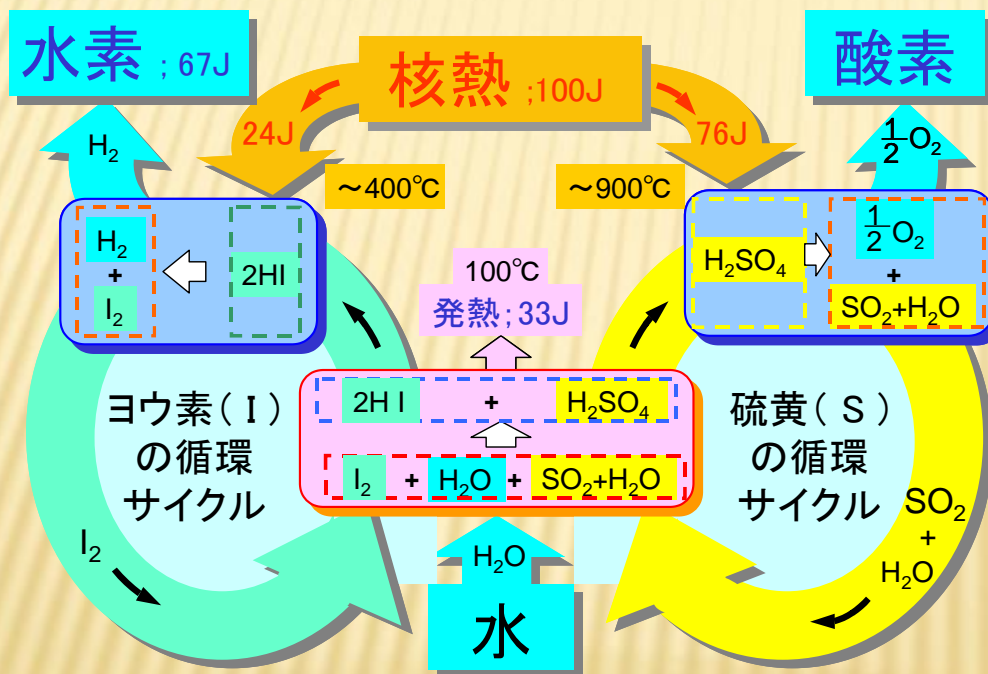
一次冷却材
二重配管

補助冷却材配管

高温ガス炉を用いた水素製造 IS プロセス

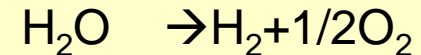
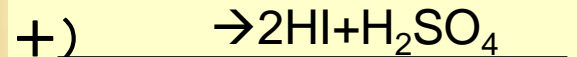
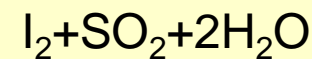
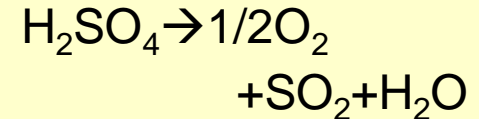
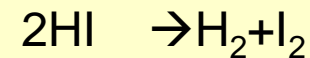
水と熱から、水素を作る 熱化学法 ISプロセス

- 水の熱分解反応が自発的に進む温度は4000°C以上。
- 三つの化学反応を用い、900°C程度で水を熱分解。



熱 → 電気 → 水素 より
熱 → 水素

I : ヨウ素、 S : 硫黄



参考: 既存の方法は、化石燃料を原料とするため、炭酸ガスを排出。

ISプロセスの開発状況

実験室規模試験

原理の検証

(1997年)

工学基礎試験

実用閉サイクル制御
技術の開発

(2004年)

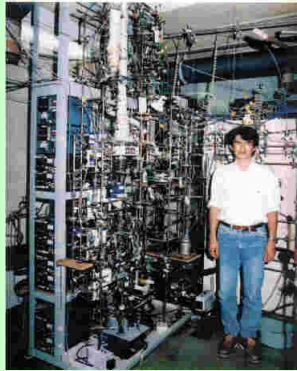
技術確証・
信頼性試験

技術確証 信頼性確証

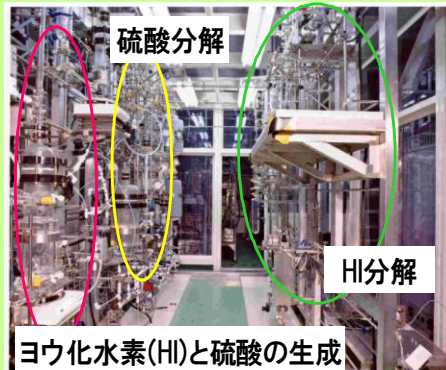
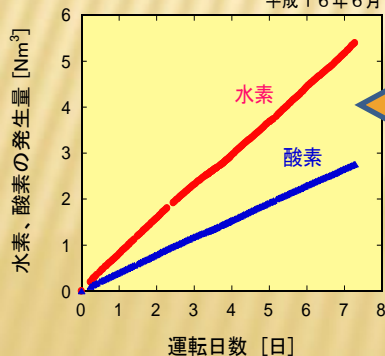
HTTR-IS試験

基盤技術の確立

現在



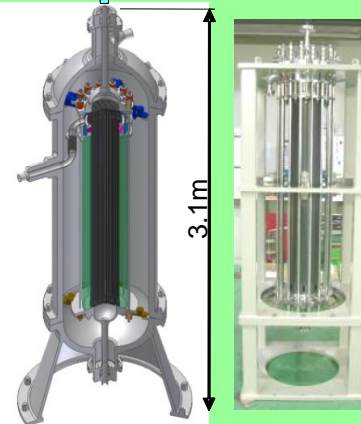
平成16年6月



石英ガラス製機器

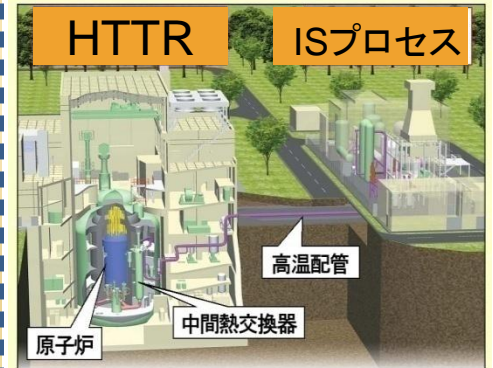
毎時約30%の水素を
1週間、連続製造に成功
(2004年)

工業材料を用いた
ISプロセス建設中



セラミックス硫酸分解器

2013年度建設完了。
(毎時200%)



HTTRとISプロセス
水素製造設備を接続

原子炉の規格基準の作成
基盤技術の完成

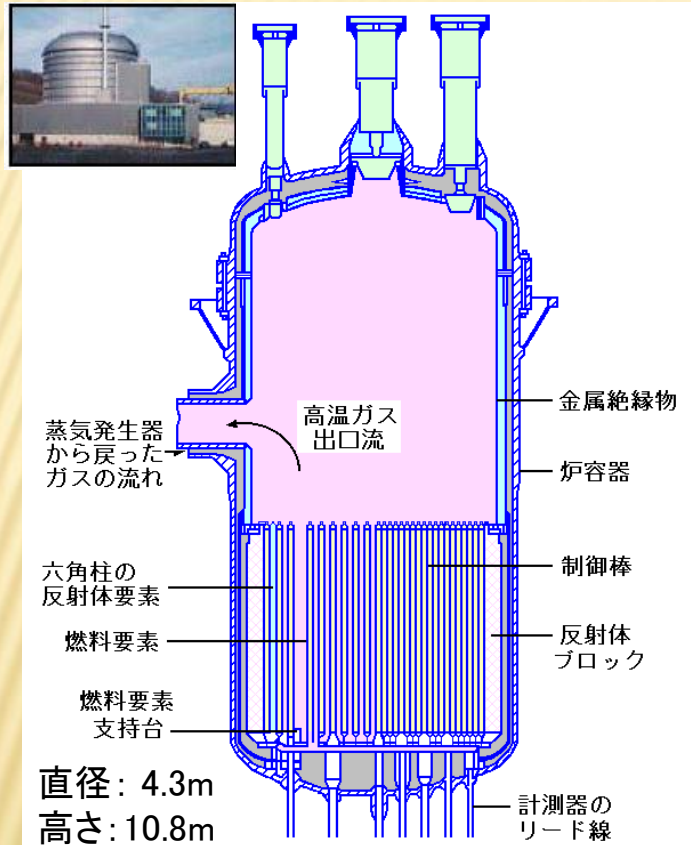
2. 国内外の状況

高温ガス炉に関する過去の実績

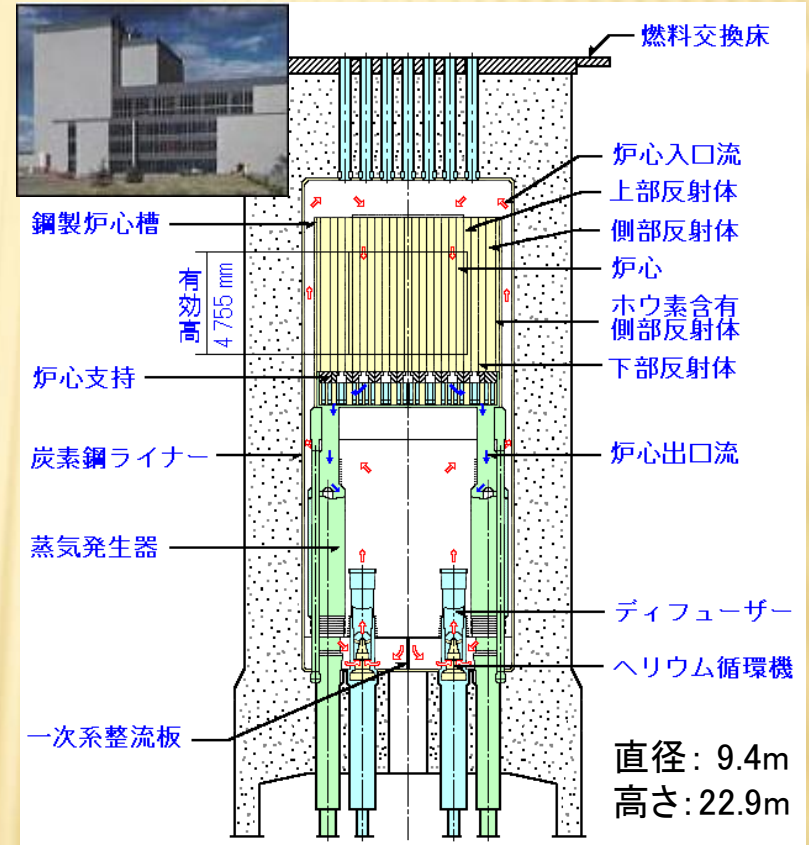
- 原子力黎明期から、即ち、軽水炉と同時期から、ガス冷却炉の開発開始。
我が国では、東海1号炉。
- より高温を目指したガス冷却炉の商用化においては、以下の表のように、
現在、**第四世代の超高温ガス炉**に至っている。(軽水炉でも、次世代は第四世代。)
- ガス冷却炉、改良型ガス冷却炉、高温ガス炉、スリーマイル事故、チェルノブイリ事故等の世界の多くの技術的知見・経験により、また、世界最先端の国産技術により、
我が国は、新型原子炉である超高温ガス炉の試験研究炉**HTTR**を完成・運転させている。

	ガス冷却炉	改良型ガス冷却炉	高温ガス炉	超高温ガス炉
燃料	天然ウラン	濃縮ウラン	同左	同左
被覆材	金属	同左	セラミックス	同左
冷却材/温度	炭酸ガス/ 約400℃	同左/600℃～	ヘリウムガス/700℃～	同左/950℃
圧力容器	鋼製、PCR/V	PCR/V	PCR/V、鋼製(小型)	鋼製(小型)
利用段階	商用炉 (英、仏、伊、日等 37基)	商用炉 (英14基)	実験炉(英、米、独各1) 原型炉(米、独各1基) 試験炉(中国1基;現存) 実証炉(中国2基;建設中)	試験研究炉 (日本 HTTR 1基)

米国の実験炉、原型炉

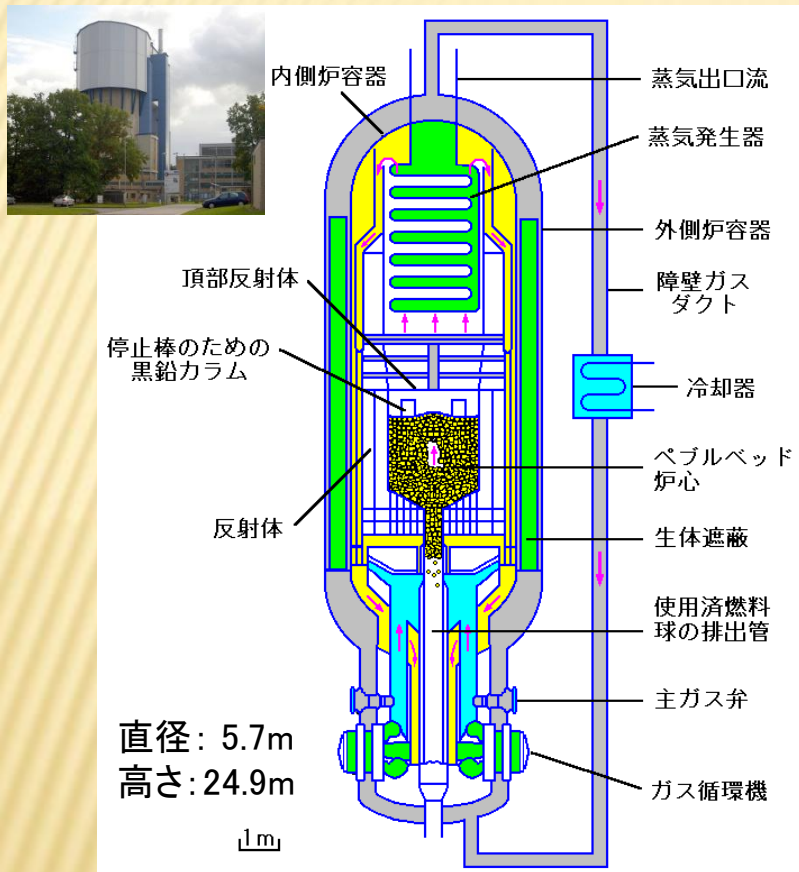


Peach Bottom 実験炉
熱出力 115MW (1967-74)

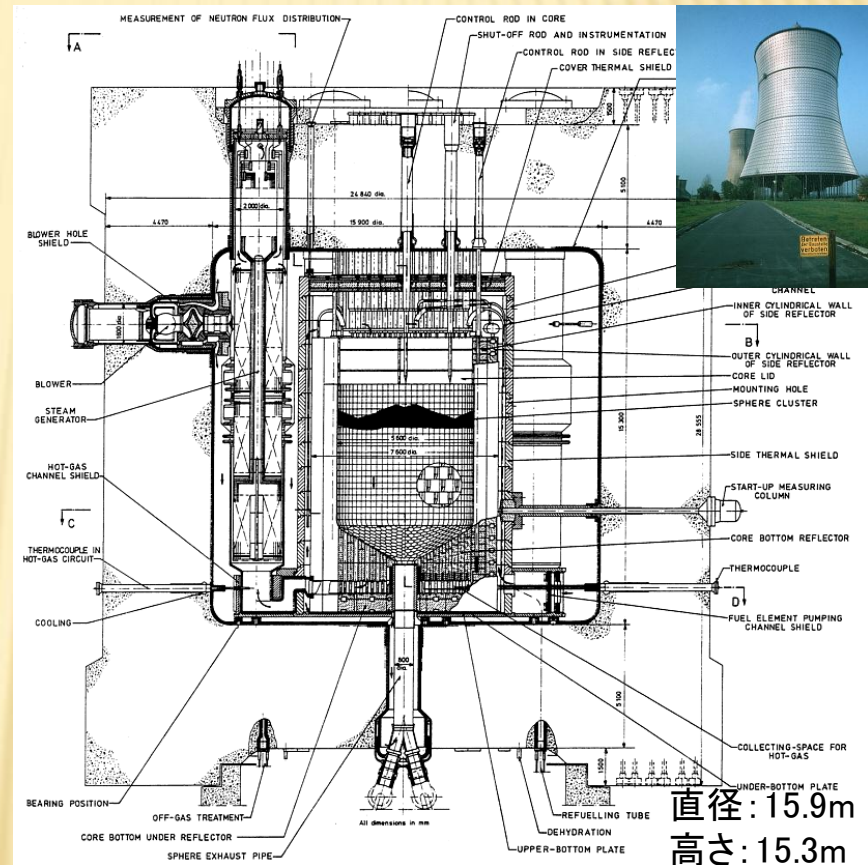


Fort St. Vrain 原型炉
熱出力 842MW (1976-89)

独国の実験炉、原型炉



AVR 実験炉
熱出力 46MW (1967-88)



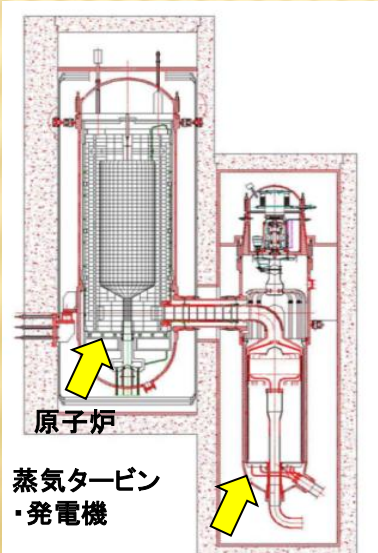
THTR-300 原型炉
熱出力 750MW (1986-89)

中国の実証炉 建設中！



HTR-PM 実証炉

熱出力 250MW 2基 (2017年建設完了予定)



19組(38基)の建設を計画。



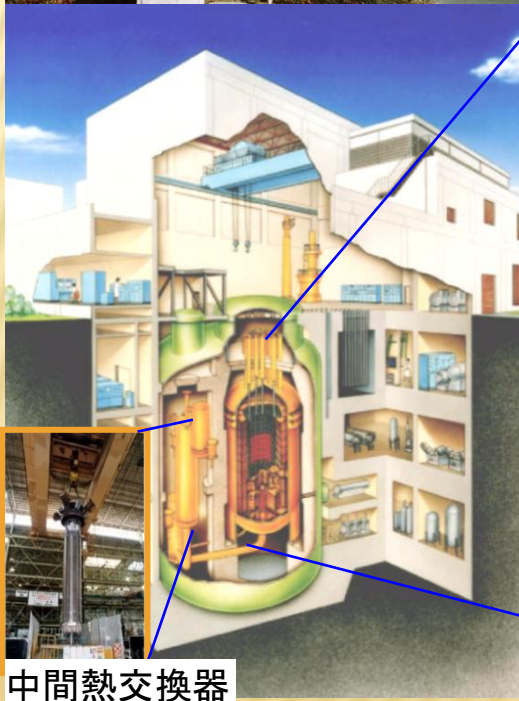
我が国の超高温ガス炉: HTTR



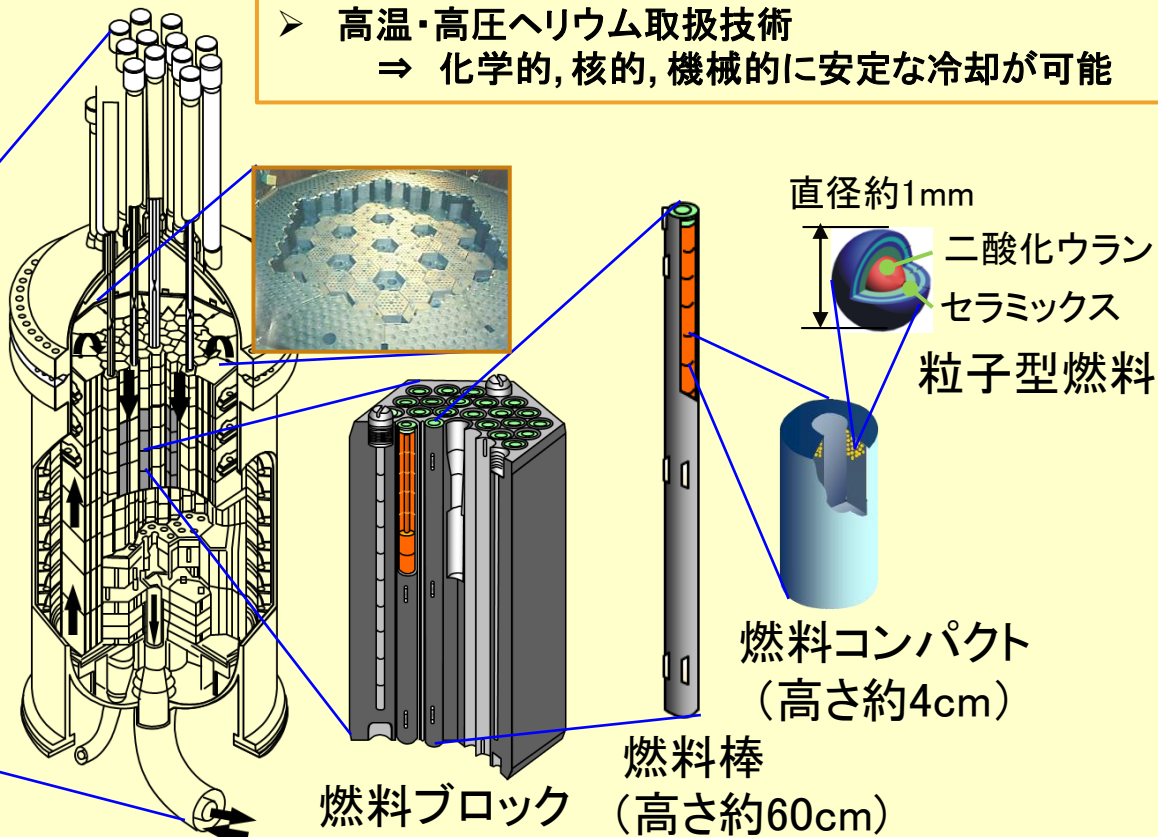
HTTR仕様

熱出力 : 30 MW
出口温度 : 950°C
冷却材圧力 : 4 MPa

- セラミックス4重被覆技術 ⇒ 長期間閉込め
- 黒鉛等方化技術 ⇒ 高強度・高熱伝導・耐照射性
- 耐熱・耐酸化ニッケル系合金技術
- 断熱, 熱伸, 防振等の高温構造設計技術
⇒ 950°Cの熱を供給可能
- 高温・高圧ヘリウム取扱技術
⇒ 化学的, 核的, 機械的に安定な冷却が可能



中間熱交換器



米国、韓国の高温ガス炉産業アライアンス

国策として、商用炉建設に向けた高温ガス炉開発を実施中。

米国NGNP計画

<電力会社>

- ・Entergy

<化学会社>

- ・Dow (The Dow Chemical Company)

<石油会社>

- ・ConocoPhillips
- ・Petroleum Technology Alliance Canada (PTAC)

<黒鉛メーカー>

- ・GrafTech International Ltd.
- ・SGL Group
- ・東洋炭素

<原子力メーカー>

- ・AREVA
- ・Westinghouse

<コンサルティング会社>

- ・Technology Insights

韓国NHDD計画

<電力会社>

- ・韓国水力原子力(株) (KHNP)
- ・KEPCO

<製鉄>

- ・POSCO

<石油会社>

- ・SK ENERGY
- ・GS Caltex

<建設会社>

- ・GS 建設

<ポンプメーカー>

- ・KNF

<自動車会社>

- ・現代自動車 (Hyundai Motors)

<重工業>

- ・Doosan Heavy Industry
- ・STX Heavy Industry

<研究機関>

- ・韓国原子力研究所 (KAERI)

OECD/NEA HTTR共同試験プロジェクト

● 概要

- ・ 高温工学試験研究炉(HTTR)を用いて、安全性実証試験
 - ✓ 1次ヘリウム循環機全3台を停止する炉心流量喪失試験
 - ✓ 炉容器冷却設備の停止を重ね合わせた炉心冷却喪失試験
- に係る事業をOECD/NEA原子力施設安全委員会のプロジェクトとして、国際協力により、効率的、効果的に推進する。

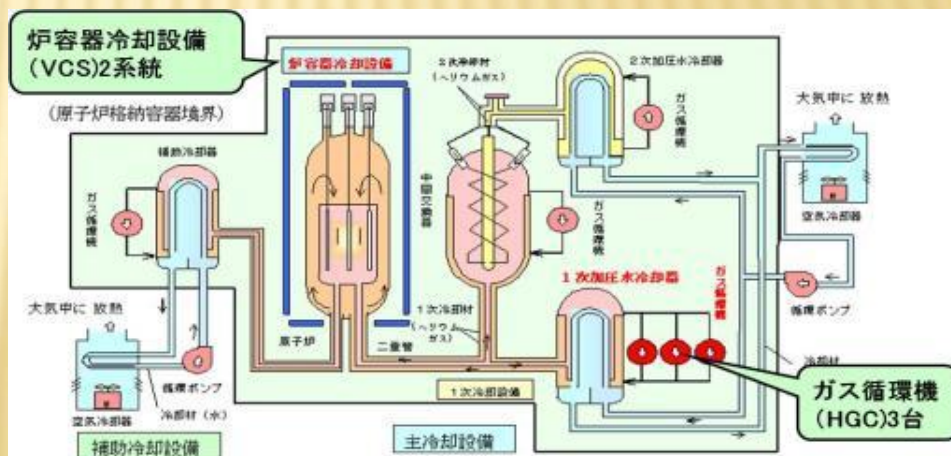
● プロジェクト実施期間

- ・ 2011年3月1日～

● 参画機関(国名)

- ・ HTTR試験費用を分担して参加。
 - ✓ 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(フランス)
 - ✓ 施設・原子炉安全協会(ドイツ)
 - ✓ 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)

試験番号	原子炉出力	試験内容	実施年度
Run 1	9 MW	循環機3台停止	2010
Run 2	30 MW		2014
Run 3	9 MW	循環機3台停止 VCS2系統停止	2014

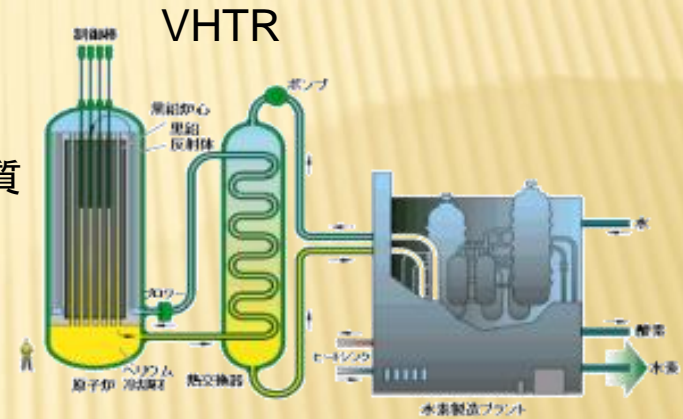


第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)

● 超高温ガス炉(VHTR)国際協力研究

目的、概要

- ・ 第4世代原子力システムは、2030年代に商業導入が可能
- ・ 安全性・信頼性、経済性、持続可能性、核拡散抵抗性と核物質防護に優れたシステム
- ・ 実証フェーズの前段階までの研究開発協力を行うため国際的な枠組み; GIFを構築
- ・ Gen-IVシステムとして6つの炉型を2002年7月に選定、そのうちの 하나가超高温ガス炉(VHTR: Very-High-Temperature Reactor)



プロジェクト名	参加国	実施期間	最近の活動内容
水素製造	日、仏、米、韓、カナダ、ユーラトム	2008.03.19 ～ 2018.03.18	ISプロセス、高温水蒸気電解、CuClプロセスの要素技術開発、等。
燃料・燃料サイクル	日、仏、米、韓、ユーラトム	2008.01.30 ～ 2018.01.29	EU及び米国の照射試験炉を利用した共同照射・照射後試験、燃料挙動モデルのベンチマーク、被覆層特性評価用ラウンドロビン試験、安全性試験結果のまとめ、等。
材料	日、仏、米、韓、スイス、ユーラトム	2010.04.30 ～ 2020.04.29	黒鉛照射データ取得、材料特性評価モデル作成、等。

我が国の高温ガス炉リードプラントの設計例

3. Expectations



3.2 Proposal for a commercialization approach



MHR-50

Phase A



MHR-50 with hydrogen production plant

Phase B

Lead Commercialization Plant

Commercial Plant

To demonstrate

- Safety feature
- Economic feature
- Developers and Supply chain
- Applicability for commercial plant

For various utilities

- Electricity
- Heat (Hydrogen, Chemical etc.)

遠山誠(三菱重工)、“Expectations to HTGR”, 6th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology HTR2012 -Nuclear Energy for the Future-, Miraikan, Tokyo, Japan, October 28-November 1, 2012. より引用

関連する活動

高温ガス炉プラント研究会

概要：高温ガス炉プラントの実用化に関する
技術調査・研究・評価、情報発信。

会員：東芝、三菱重工業、富士電機、
原燃工、大林組

オブザーバー：東京電力(株)、関西電力(株)、
東北電力(株)、日本原子力発電(株)、
(財)電力中央研究所、原子力機構等

期間：1985年～

グリーンエネルギー フォーラム

(日本鉄鋼協会)

概要：高温ガス炉を用いた水素還
元製鉄プロセス等の検討

参加者：鉄鋼企業、大学、JAEA等

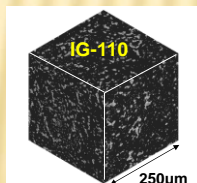
期間：2013～

グリーンエネルギー
製鉄研究会報告書
(2012年3月)



東洋炭素

TOYO TANSO 



- 中国HTR-10、HTR-PMに
HTTRで用いたIG-110黒鉛を納入。

「高温ガス炉の安全設計方針」 研究専門委員会(日本原子力学会)

- 2013年度から2年間、本質的安全性
概念等に関する安全設計方針案を
作成する。

国のエネルギーキャリアプロジェクト

概要

再生可能エネルギーを水素等に転換する「エネルギー貯蔵・輸送技術」の開発に関する国家プロジェクト

実施主体・運営

産業界・文科省と経産省が連携

期間・総予算・内容

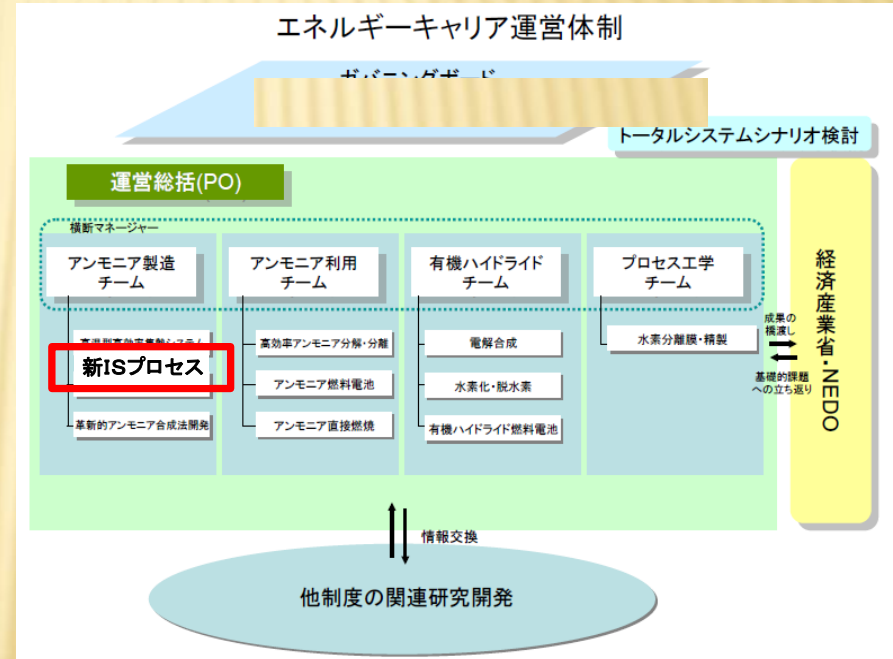
平成25年度から6年間
約100億円で、要素技術開発

新ISプロセス水素製造

産官学が共同で開発

次段階

次の5年間、実証試験に移行



3. 社会からの要請への対応力

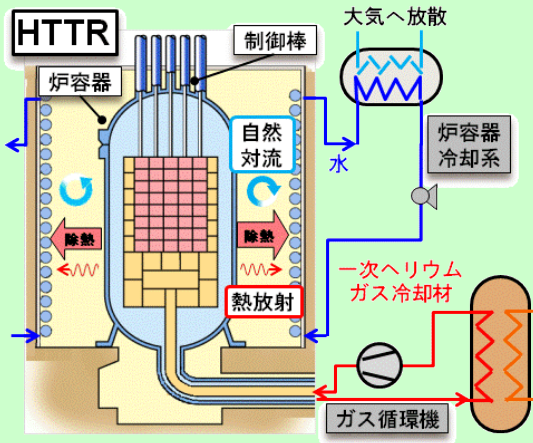
エネルギー生産プラントとして満足すべき要件

- 安全性
- 環境保全性(廃棄物): 放射性物質、炭酸ガス
- 経済性
- その他: 利用性、市場規模、核不拡散性

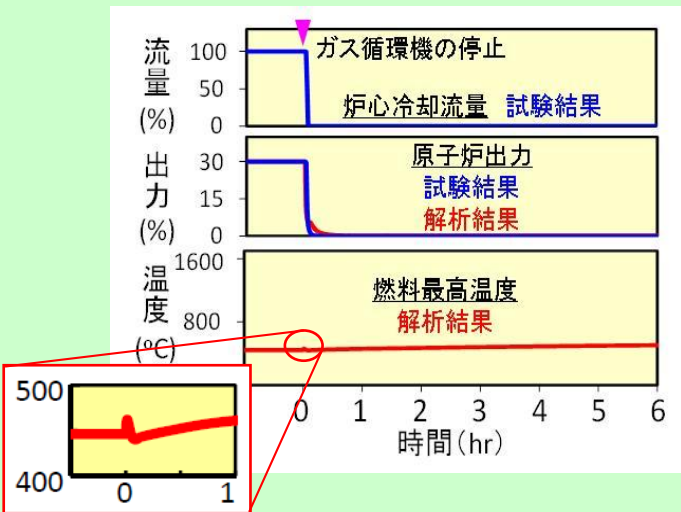
(1) 安全性

HTTR試験条件 2010.12 実施

- 初期出力30% (9MW)
- 炉心冷却用のガス循環機停止
- 停止操作(制御棒挿入)なし
- 炉容器冷却系の運転継続



HTTR試験結果

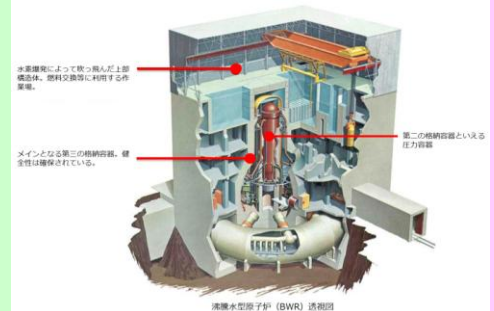


制御棒未挿入でも
自然に原子炉出力低下！

崩壊熱除去のための
炉心冷却設備が不作動でも
自然に冷却！

HTTRでは、
原子炉が自然に静定！

東電福島原発事故



✓地震

- 制御棒挿入
- 原子炉停止

✓津波

- 電源喪失等
- 崩壊熱除去不能
- 燃料温度上昇・溶融

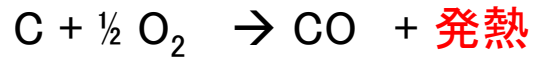
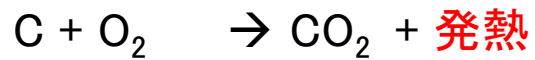
- 水素爆発
- 放射性物質放出

高温ガス炉における厳しい事故

配管破断によって、ヘリウムガスが放出され、炉心内へ空気が侵入し、黒鉛が酸化され、発熱、並びに、可燃性気体（一酸化炭素）が発生する。

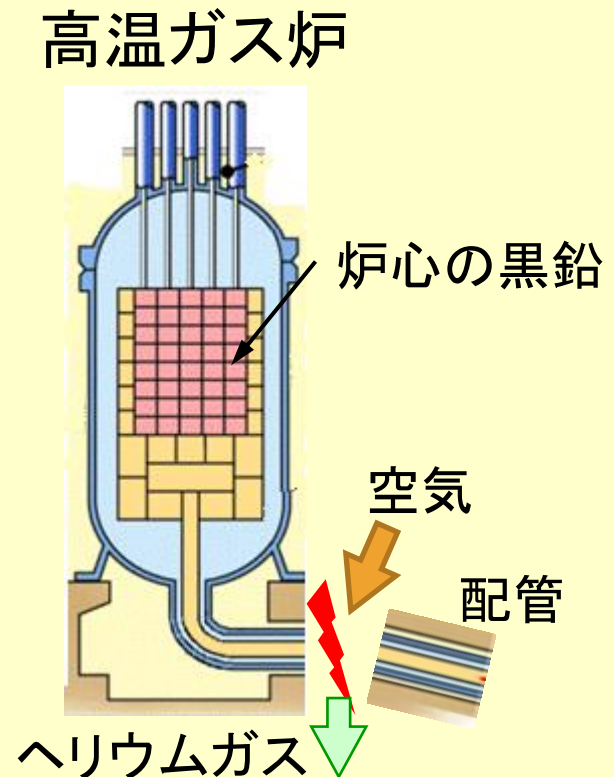
事故事象の進展

1. 配管破断、ヘリウムガス放出
2. 炉心内への空気侵入
3. 黒鉛酸化

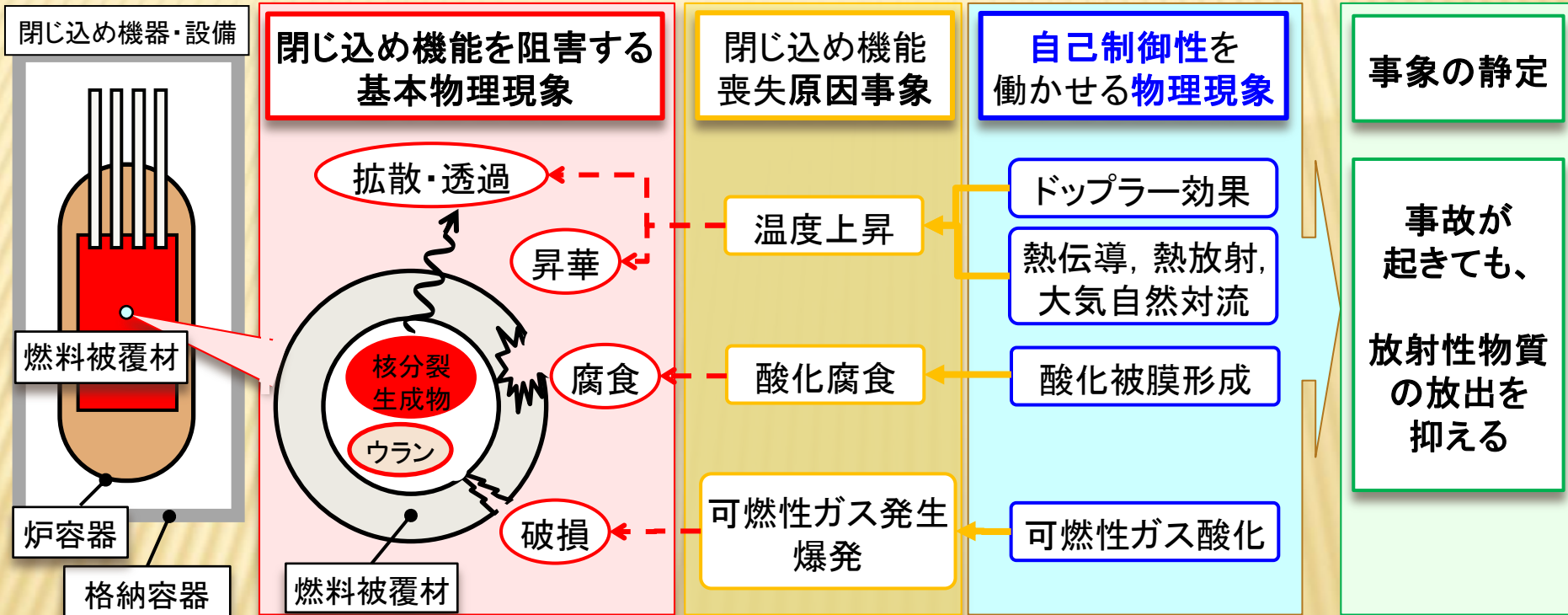


参考:

黒鉛は、鉄と同じように燃えないが、鉄と同じように酸化する。



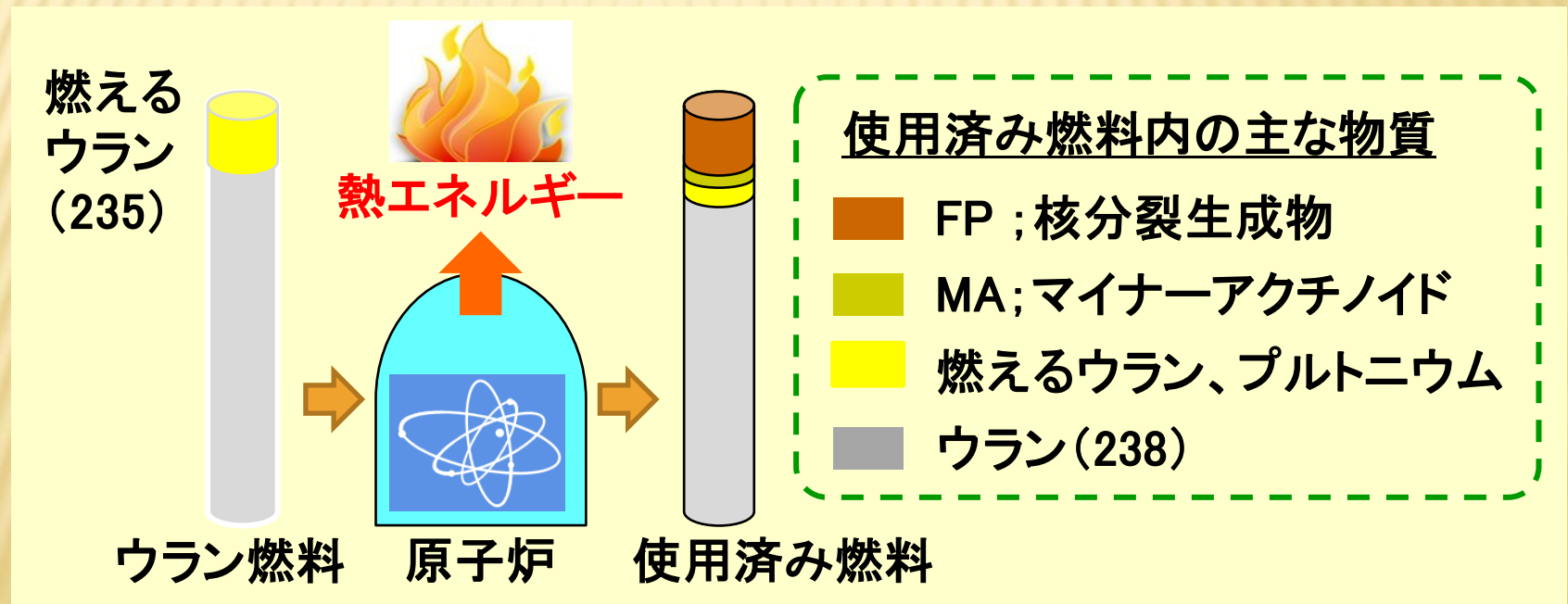
事故防止できなくとも、物理現象だけで、影響緩和



いかなる安全設備・機器が動作しなくとも、物理現象だけで、
環境・公衆に大きな影響を与えることなく、
事象を静定させることができる **本質的な安全性**を確保可能。

(2) 放射性廃棄物

1. 使用済み燃料の量の低減。
2. 放射性有害度の低減。
3. 発熱性、水溶性の放射性廃棄物の安定化。

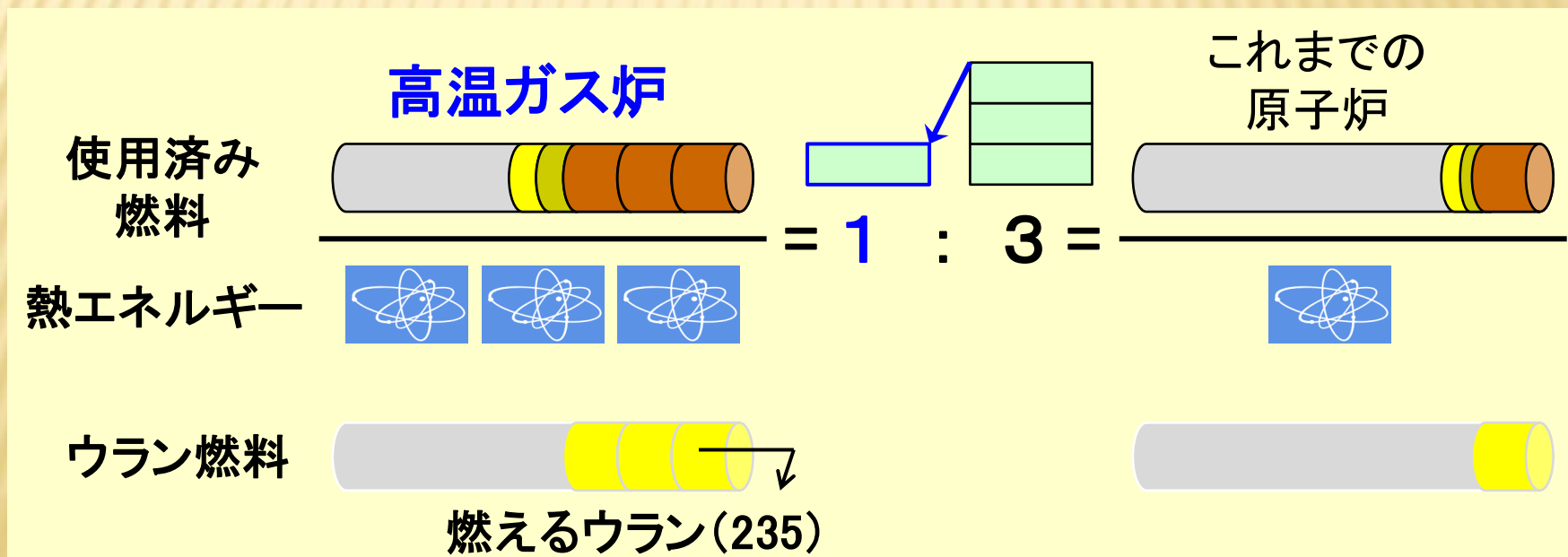


使用済み燃料の量の低減

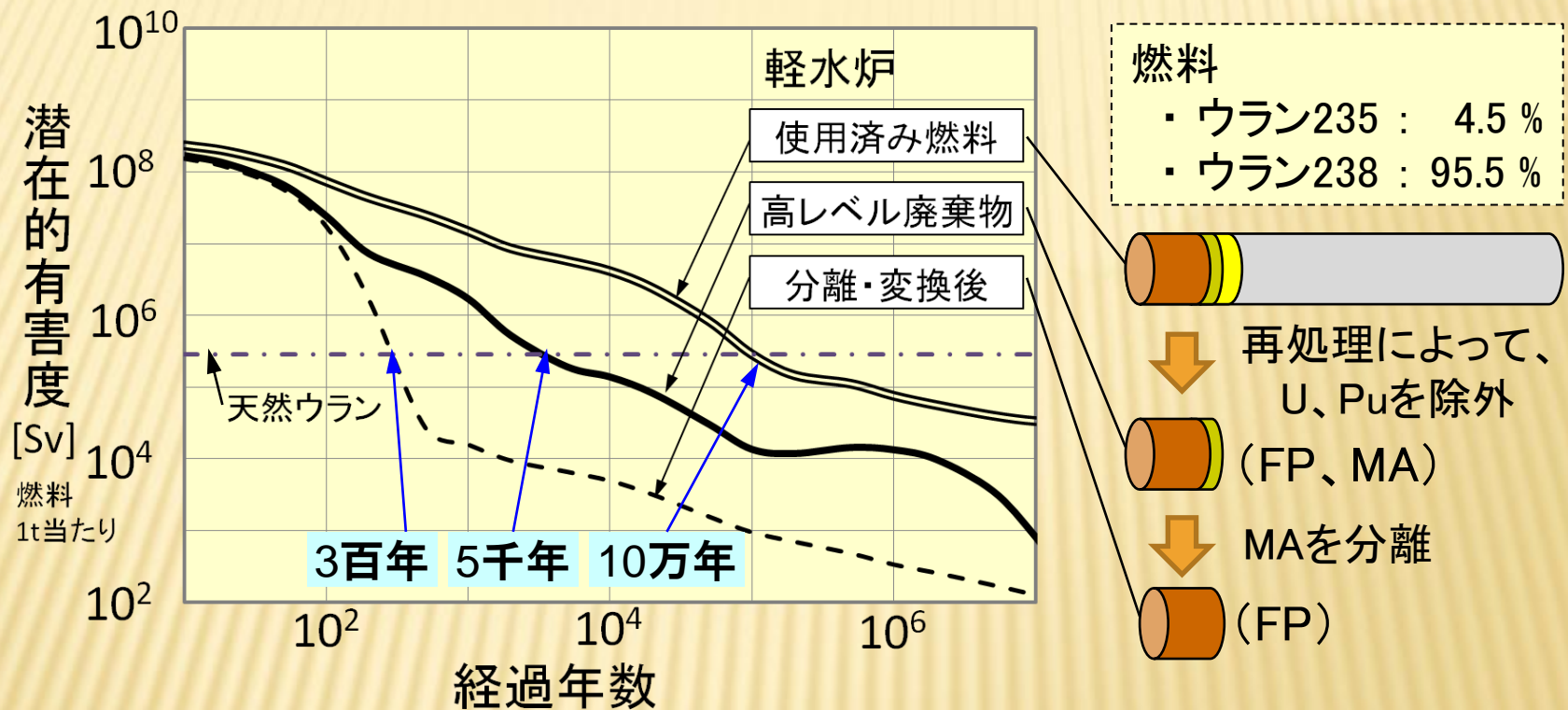
- 高温ガス炉の燃料被覆材の高耐久性により、燃えるウラン量を3倍程度多くできる。



熱エネルギー当たりの使用済み燃料の量を約3分の1に減らすことができる。



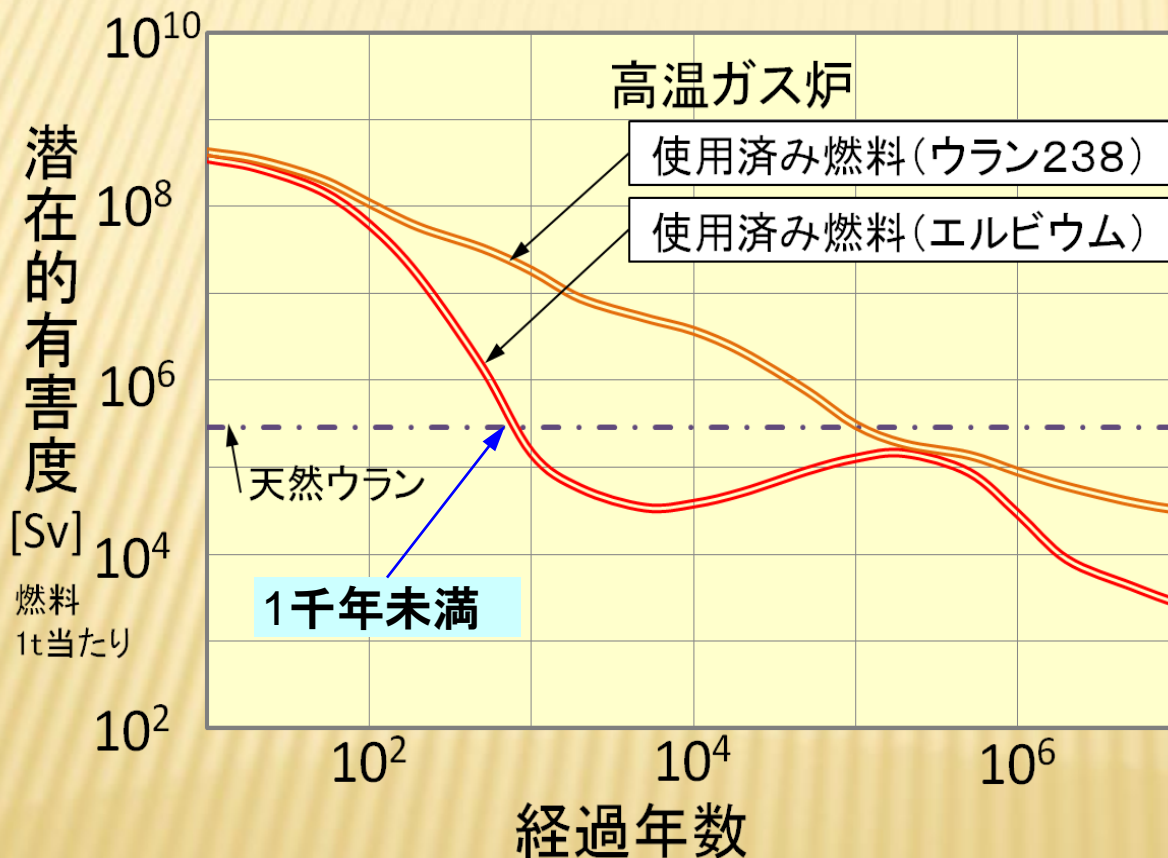
参考：放射性有害度



主にウラン238から生成される
MA(マイナーアクチノイド)の高い放射性有害度

放射性有害度の低減

ウラン238の代わりに、エルビウム68の利用により 放射性有害度の大幅な低減が可能



高温ガス炉

ウラン238通常燃料

- ・ ウラン235 : 10 %
- ・ ウラン238 : 90 %

エルビウム燃料

- ・ ウラン235 : 10 %
- ・ エルビウム、YSZ : 90 %

参考:

エルビウム燃料には、
高濃縮ウランが必要。

放射性廃棄物の安定化

核分裂生成物(FP)等の放射性廃棄物の発熱性と水溶性

➤ 熱的課題の解消

発熱は体積、冷却は面積ゆえ、小さい機器ほど、良く冷える。

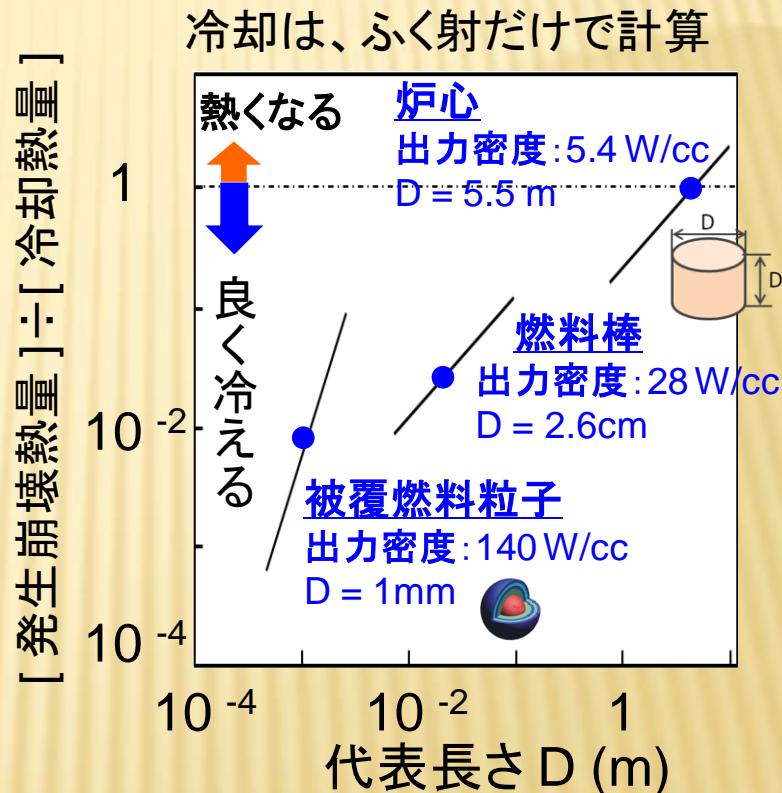


燃料棒、さらに小さなペレットの状態では、強制冷却不要。



ペレット

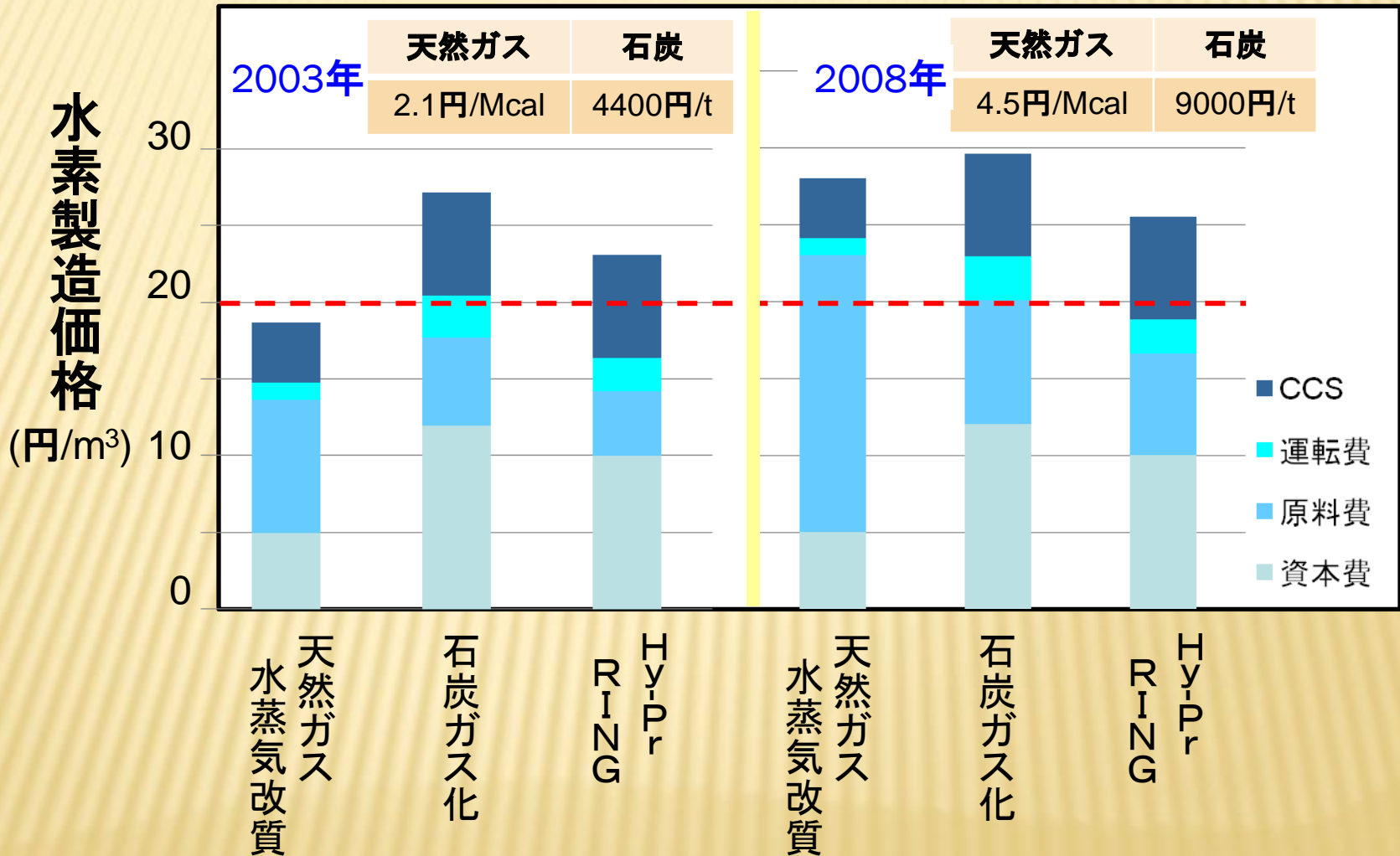
燃料棒



➤ 地下水への溶解の解消

不活性母材型燃料 (U/Er/YSZ) により、難水溶性化が可能。

(3) 経済性



参考文献: 石炭利用CO₂回収型水素製造技術プロジェクト評価(事後)報告書 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 2009 p.17

高温ガス炉の大きさ

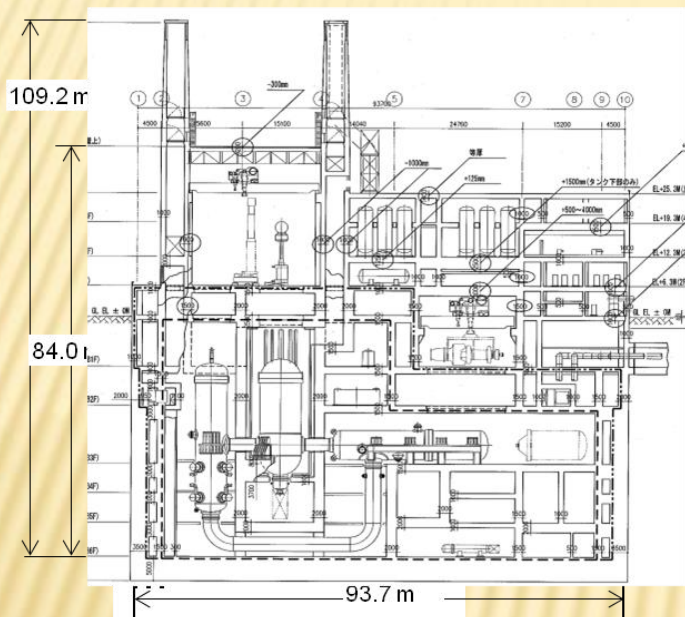
高温ガス炉

(GTHTR300 (275MWe x 4基))

同じ電気出力

軽水炉

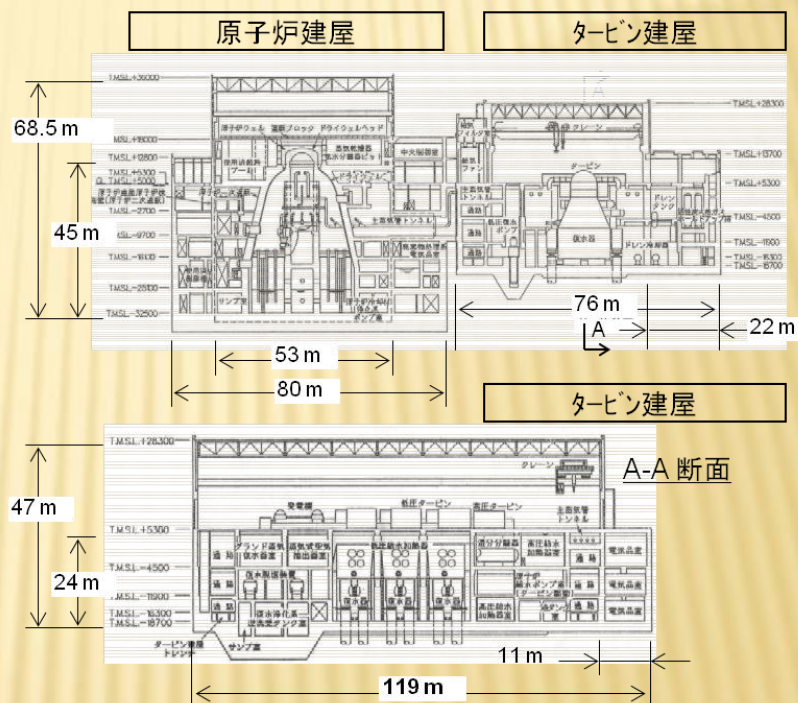
(BWR-5 (1100MWe))



★建屋容積: 533,000 m³



建屋容積は、軽水炉の約8割



★建屋容積: 674,000 m³

- 原子炉建屋: 354,000 m³
- タービン建屋: 320,000 m³

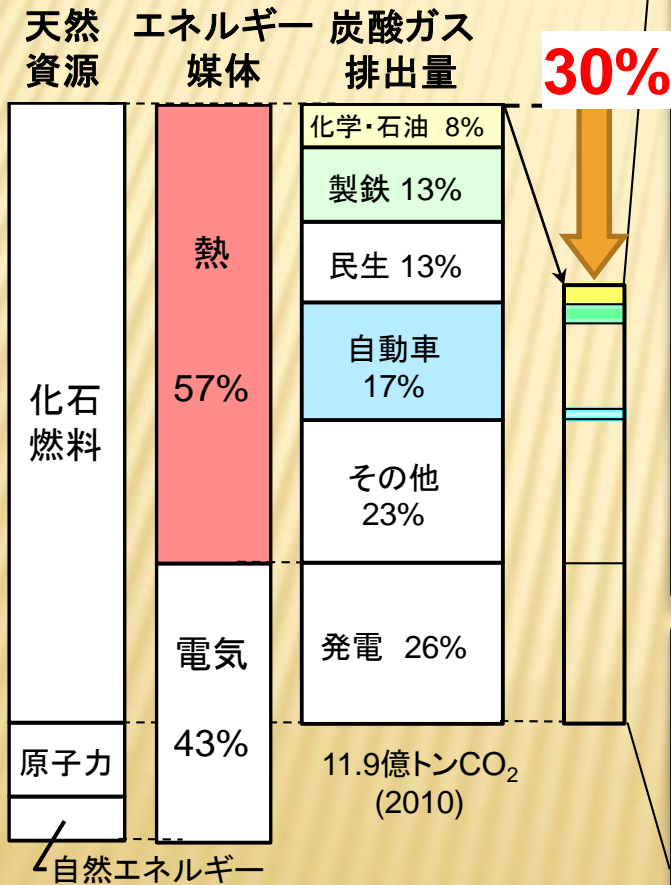
出典: X. Yan, et al., Nuclear Eng. Design., 226, p351-373 (2003)

出典: 図は“柏崎刈羽原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書(3号炉)”より引用

(4) 様々な熱利用による 炭酸ガス排出量低減

課題: 熱利用分野での
炭酸ガス排出量削減

解決法: 高温ガス炉の導入
600MW 1基で約0.1%の削減



化学・石油プラント

プラント使用熱量	27GW
必要なHTGR	55基
炭酸ガス排出削減量	5%

メタンハイドレート・シェールガス, GTLの水蒸気改質 化学プロセスの熱源

水素還元製鉄

鉄鉱石
水素
還元剤
高温熱 (~950°C)
熱源

粗鋼生産量	1.1億トン/年
必要なHTGR	85基
炭酸ガス排出削減量	9%

解決策: 高温ガス炉による熱供給

熱出力	600 MW
出口温度	950°C
冷却材	ヘリウム
燃料被覆材	セラミックス
減速材	黒鉛

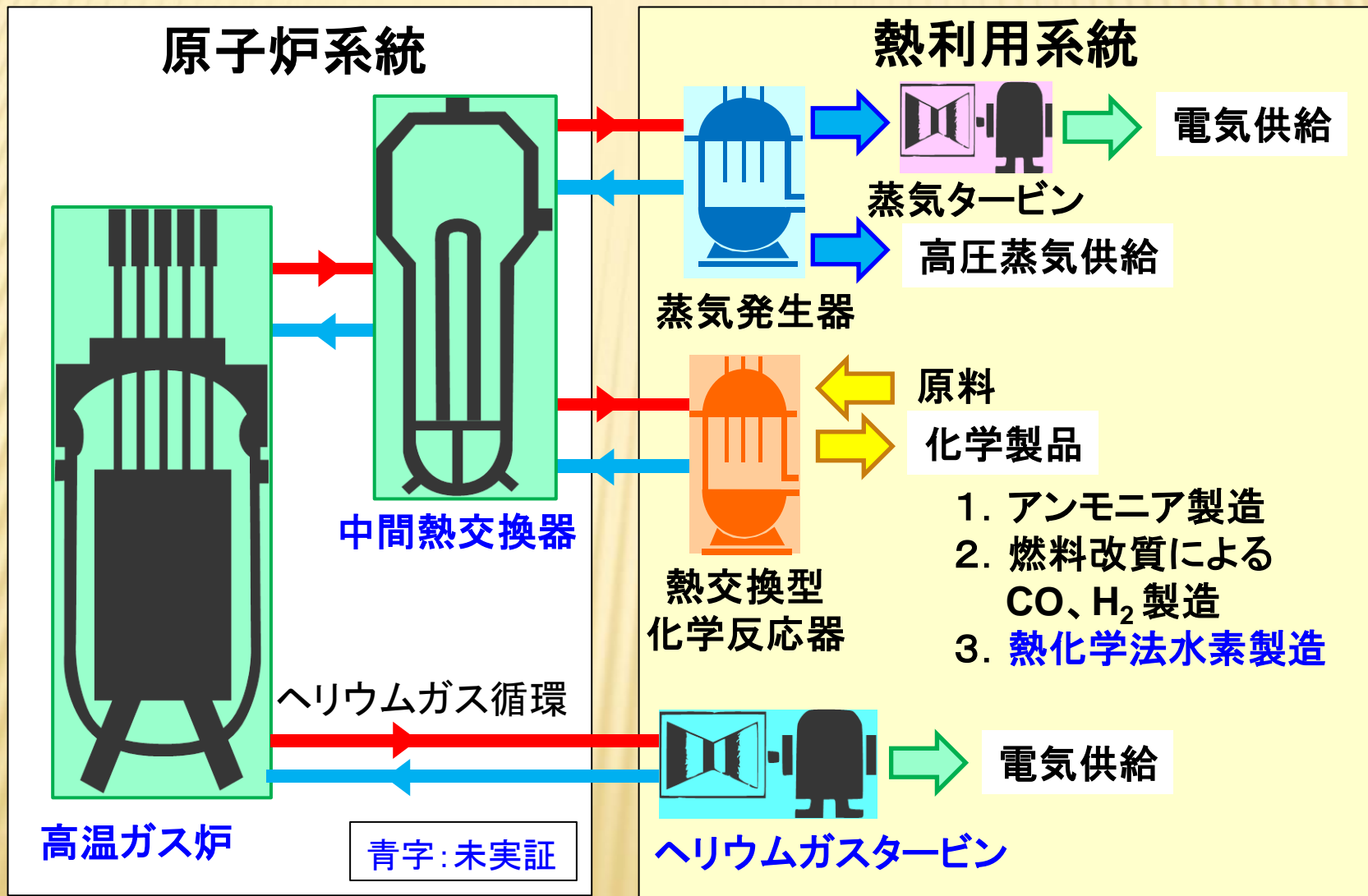
高温熱 (約800°C) 蒸気 (約540°C)

燃料電池自動車

自動車総数	7,500万台
必要なHTGR	130基
炭酸ガス排出削減量	16%

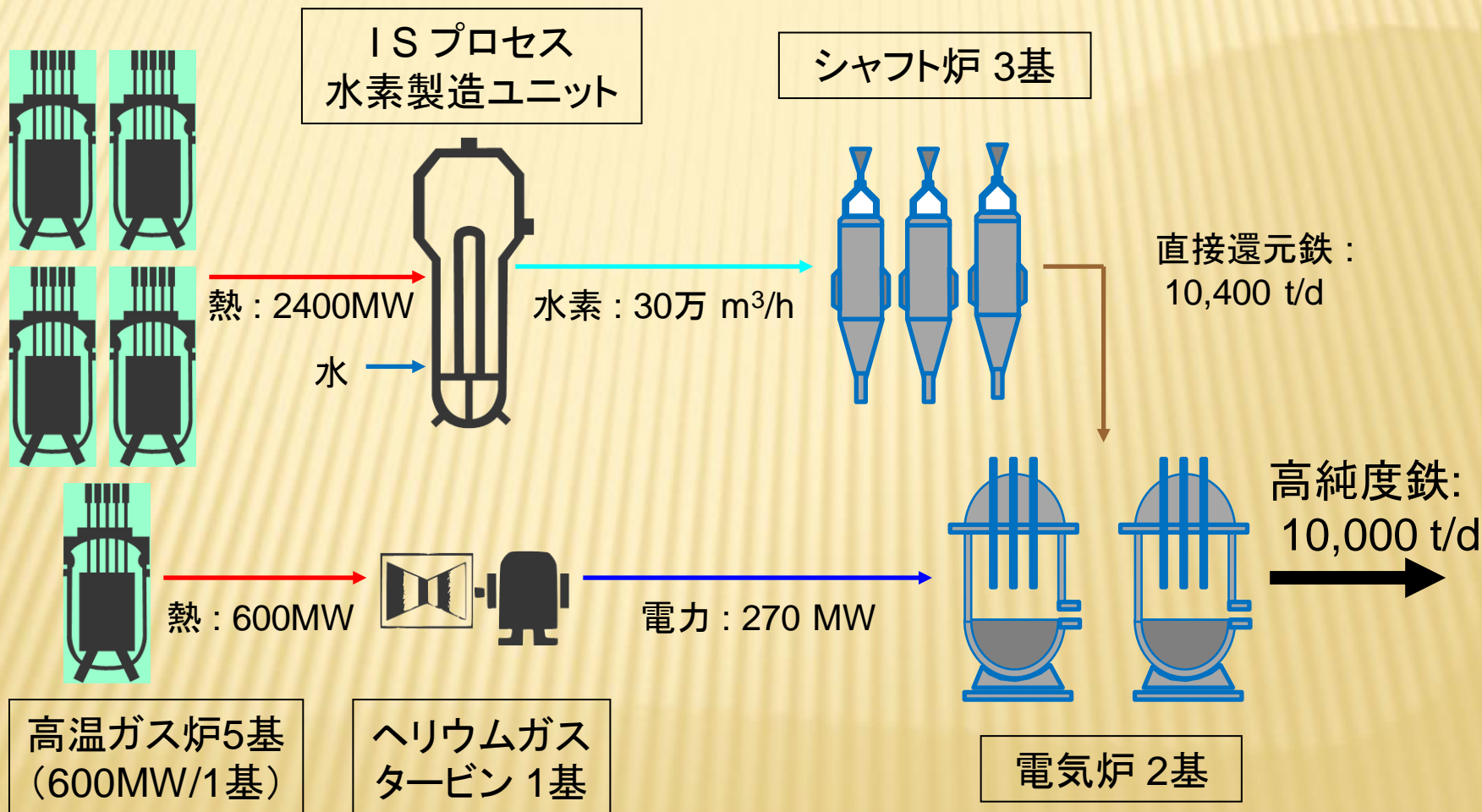
水素 燃料

熱利用高温ガス炉システムの概略

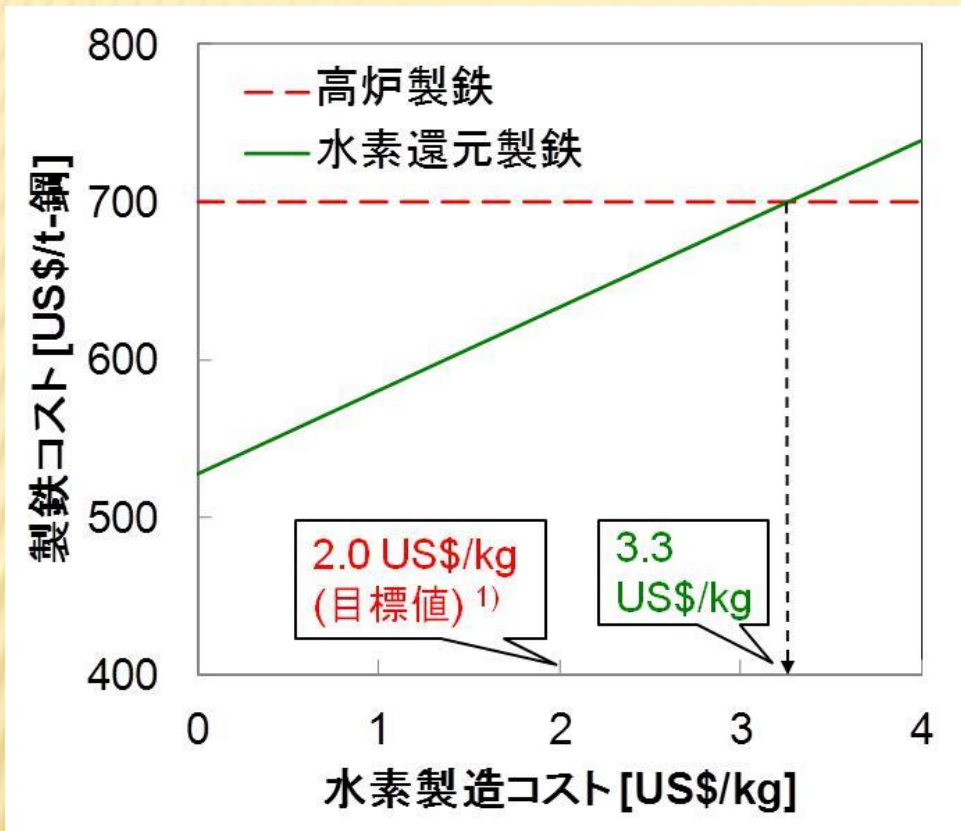


水素還元製鉄プラントの規模

— 日産1万トン(高炉1基)の場合 —



水素還元製鉄の経済性概算



- × 水素還元製鉄コストが高炉製鉄コストと等しい場合の水素製造コスト:
3.3 US\$/kg
- × 原子力水素の研究開発における目標製造コスト¹⁾:
2.0 US\$/kg (約20円/m³)

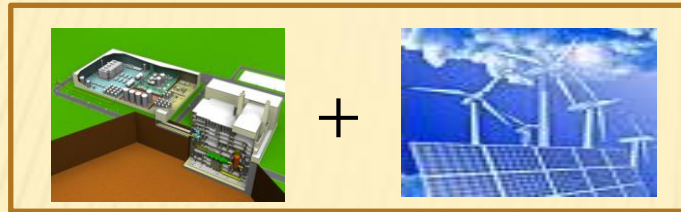


原子力水素製造コストの
開発目標値はほぼ妥当！

2008年原料コスト(鉄鉱石、石炭)²⁾
コストは2000年の物価に換算^{3, 4)} (1 US\$ = ¥114.9 (2000年))⁴⁾

- 1) 原子力委員会, 地球温暖化対策に貢献する原子力の革新的技術開発ロードマップ, 2008.
- 2) Lockwood Greene Technologies, LG Job No. 010529.01, 2000.
- 3) 財政金融統計月報, 財務省財務総合政策研究所, vol.710, 2011, June, p.57
- 4) International Monetary Fund, Currency Composition of Official Foreign Exchange Reserves (COFER), 2011

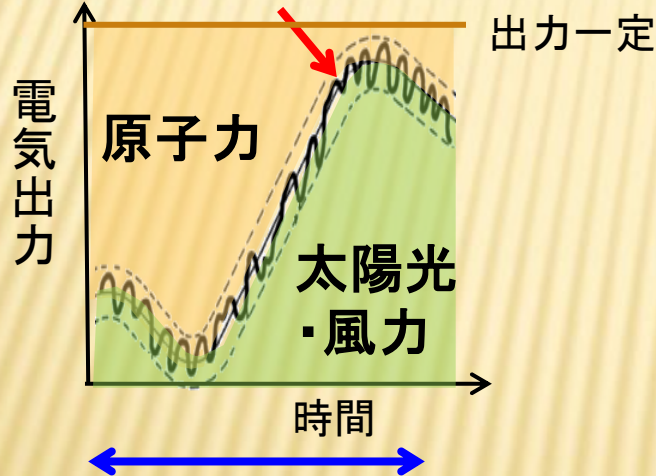
再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム



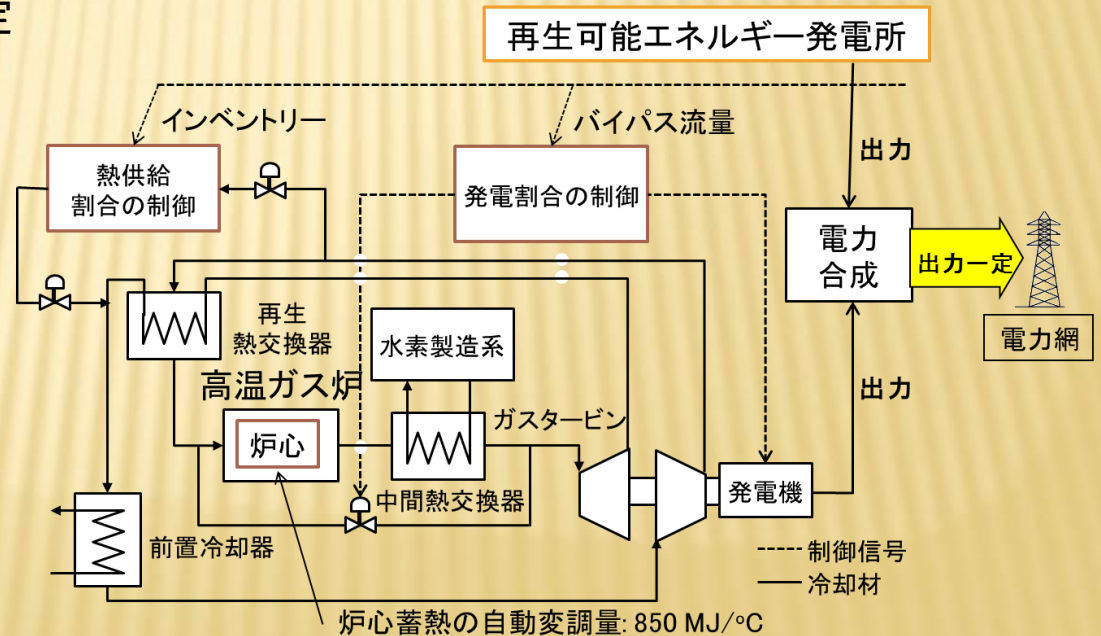
→ 一定電力
→ 水素

短い時間スケール(秒/分)
再生可能エネルギー変動に応じ、
高温ガス炉のヘリウムガス流量を
変え、発電量を調整。

再生可能エネルギーと 水素/電力併給高温ガス炉の ハイブリッドシステム

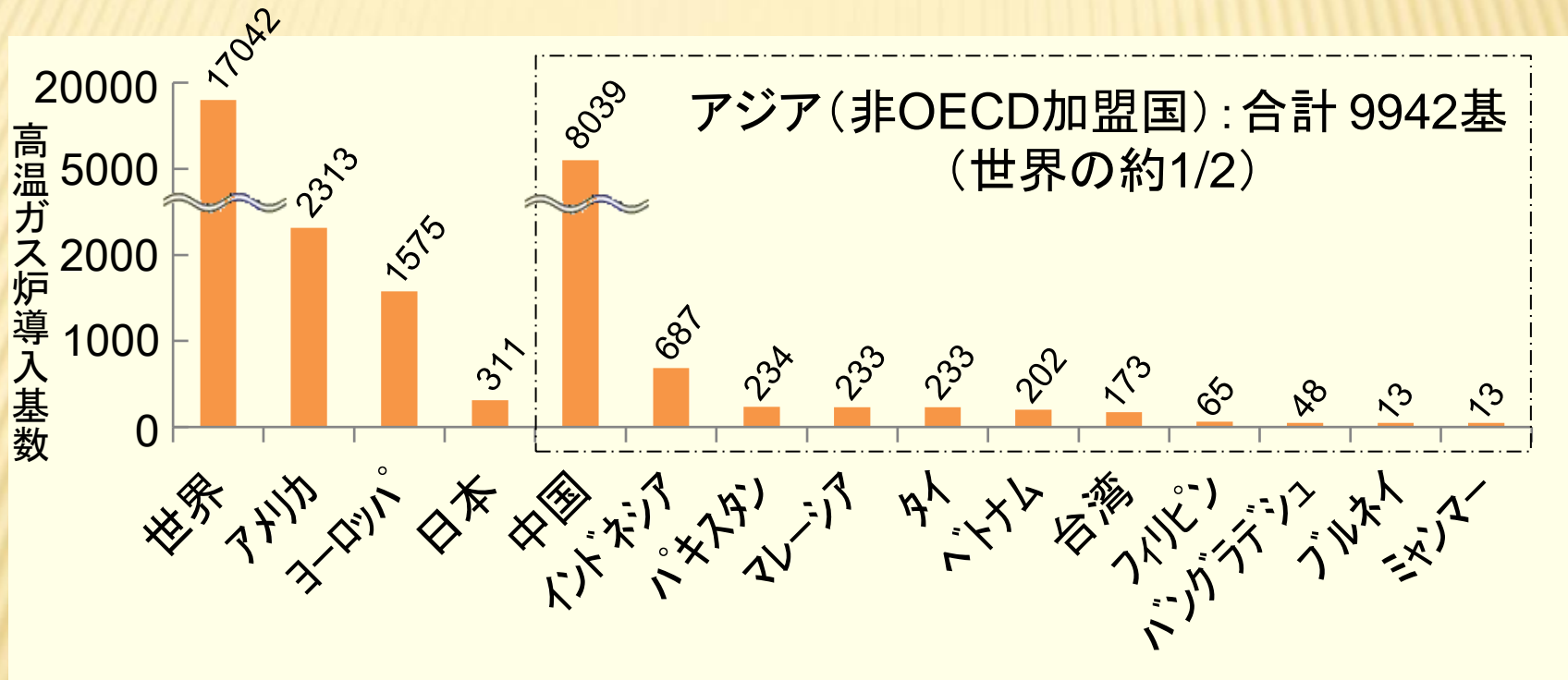


長い時間スケール(時/日)
再生可能エネルギー変動に応じ、
発電と水素製造割合を調整。



(5-1) 市場規模

2030年の高温ガス炉の導入可能基数



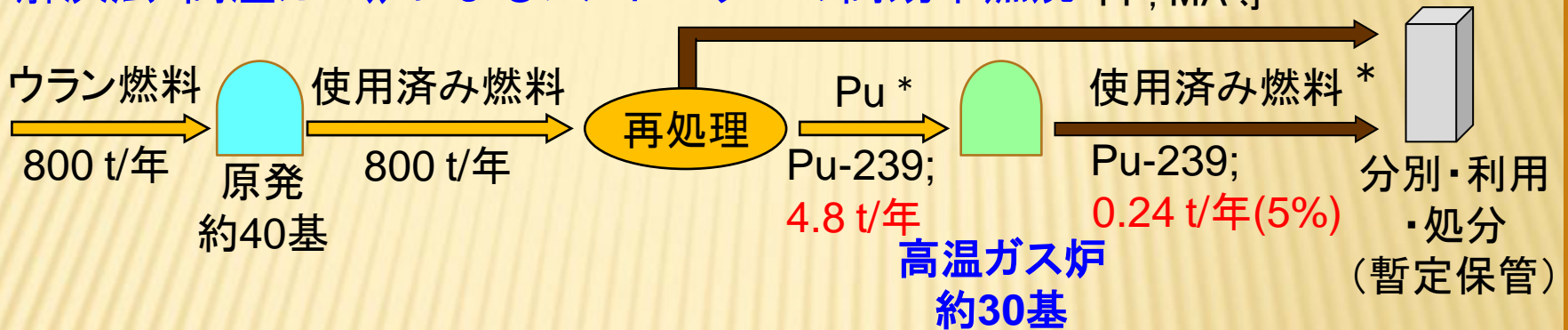
計算条件: 原子炉熱出力: 200MW/1基、稼働率: 90%、熱利用率: 80%

熱需要: OECD IEA, Energy Statistics of Non-OECD Countries: 2007-2008 (2010 edition), OECD, Paris (2010).
 OECD IEA, Energy Statistics of OECD Countries: 2007-2008 (2010 edition), OECD, Paris (2010).
 需要予測: US EIA, International Energy Outlook 2013, DOE/IEA-0484 (2013).

(5-2) プルトニウムの高効率燃焼

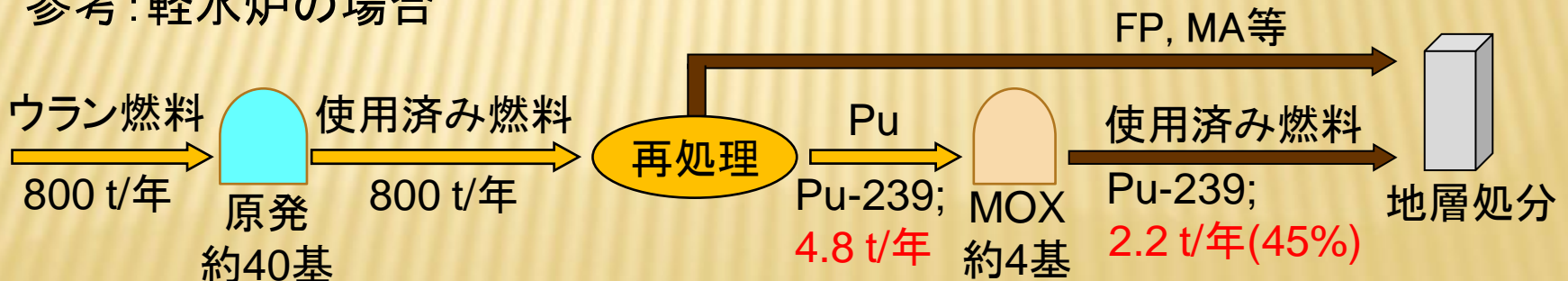
課題：余剰プルトニウムを持たない。

解決法：高温ガス炉によるプルトニウムの高効率燃焼 FP, MA等



* : 不活性母材型燃料; PuO₂-YSZによる (1) 被覆材の高燃焼度化、(2) 難水溶性化

参考：軽水炉の場合



4. 展望

- 炭酸ガス排出量低減のための具体的技術方策として、高温ガス炉システムは、最も有望な技術のひとつ。

高温ガス炉システムの特長:

- ✓ プロセスヒート、高圧蒸気、水素、電気等の供給
地域暖房、海水淡水化等の様々な熱利用。
 - ✓ 炉心溶融が起きない本質的安全性。
 - ✓ 放射性廃棄物量・有害度の低減。
 - ✓ 再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム
- 商用炉の前に、リードプラントの建設が必要。
 - ✓ 原子力黎明期からの技術・経験の蓄積。
 - ✓ 現状技術で、750°Cの熱利用リードプラントを建設可能。
 - ✓ 今後、水素製造、様々な燃料形態対応性等の大きな発展性。



HTR2012の三菱重工講演資料より

将来構想

2050年

商用高温ガス炉



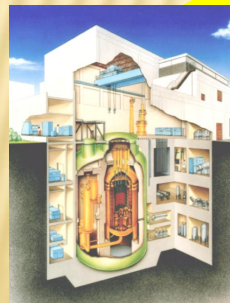
2025年

リードプラント の建設



HTTR

現在



- ✓ 750°Cで、プロセス
ヒート供給用
- ✓ 経済的に競合
- ✓ 炉心溶融しない
- ✓ 現状技術で建設可

- ✓ 世界の大きな市場規模
- ✓ 炭酸ガス排出量低減に大きな効果
- ✓ エネルギーセキュリティ優位性

将来の発展性

- 水から水素を製造し、供給可。
- エルビウムの利用による放射性廃棄物の有害度低減。
- プルトニウムの高効率燃焼可。
- 海水ウラン利用。

HTTRを見学して下さい！



茨城県大洗町