

# 高温ガス炉の海外展開

平成28年2月5日

日本原子力研究開発機構  
高温ガス炉水素・熱利用研究センター

國富 一彦

原子力研究開発機構  
基盤技術の確立・安全基準の原案作成

国内産業界(国内ユーザーを含む)  
ビジネス戦略構築・機器製作／建設

## 国際機関の活用

- 日本が提案する高温ガス炉の安全基準(動的安全設備に期待しない安全基準)などのコンセンサスを取得
- 日本の技術が採用される燃料、材料(黒鉛・金属)、等の設計基準の提案
- 日本の高温ガス炉技術の国際標準化

経済協力開発機構原子力機関  
(OECD/NEA)  
LOFCプロジェクト

国際原子力機関(IAEA)  
CRP等

第4世代原子力システム国際フォーラム  
(GIF) VHTR

## 二国間協力の活用

- 日本の高温ガス炉技術の国際標準化
- 日本の高温ガス炉技術の海外プロジェクト採用(国内メーカーの建設受注、黒鉛等の日本製品の採用)
- 日本の高温ガス炉技術を海外で実証

英国  
U-Battery計画

インドネシア  
試験・実証炉、  
商用炉計画

米国  
NGNP計画

- 技術及び実証炉の共同開発

中東  
潜在的ユーザ

カザフスタン  
KHTR計画

韓国  
NHDD計画

- コンポーネント等の受注

中国  
実証炉計画、  
商用炉計画

- コンポーネント等の受注

高温ガス炉協議会  
(国内産業界アライアンス)

政府、産業界、大学、原子力機構が一体となった活動へ繋げる。

# 国際競争を勝ち抜くために何が必要か。

昨年実施されたインドネシア原子力庁(BATAN)による高温ガス研究炉概念設計(約5億円のプロジェクト)に対して、日本の商社を原子力機構が支援する体制で国際入札に参画したが、**ロシア ROSATOM傘下のNUKEM(旧ドイツ)が落札**

- NUKEMが落札する前後におけるROSATOMとBATANの関係
    - 2014年9月 BATANとROSATOMの間でPLTN(小型炉、HTR)の検討を行う共同グループを設立。
    - 2014年11月 **ロシア政府としてBATANのPLTNに関して、技術移転だけでなく、財政、人材育成の観点からもBATANを支援することを約束。**
    - 2015年2月 国際入札の開始
    - 2015年4月 ROSATOM傘下のNUKEMが落札
    - 2015年4月 ROSATOM傘下の**JST Isotope**からCo-60をRel-ion(インドネシア)へ納入
    - 2015年6月 ROSATOMとBATANの間で **研究協力、人材育成等**に関するMOUの締結
    - 2015年9月 ROSATOM傘下の**Oversee INC**とBATANの間で**大型原子力プラントの建設**に関するMOUの締結
    - 2015年12月 ROSATOM傘下の**燃料会社TVEL**とBATANの間で**燃料製造**に関するMOUの締結
- 大型炉、小型炉、燃料製造、アイソトープから原子力人材育成まで含めた協力を約束。財政支援も約束。**

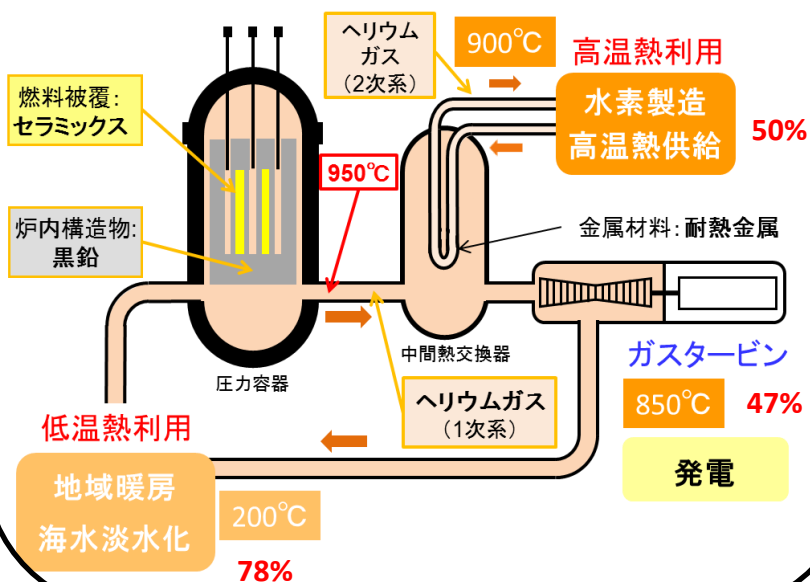


相手国のニーズに合わせて、政府、メーカー、ユーティリティ、大学、研究所などが一つになって行動しなければ国際競争には勝てない。

## コジェネ高温ガス炉の市場 >100 基

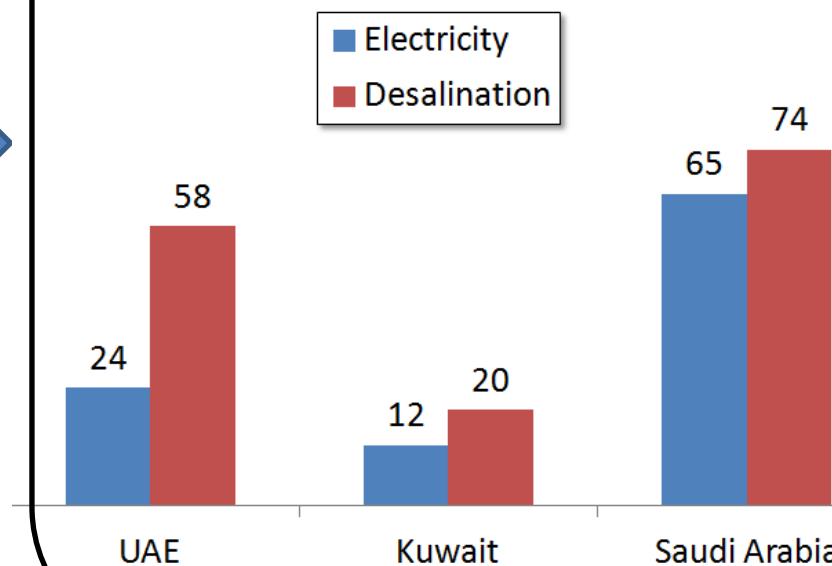
### 商用コジェネ高温ガス炉 (水素/電力/淡水化併産)

- 原子炉熱出力600 MWt
- 発電量 204 MWe
- 水素製造量 30,655 Nm<sup>3</sup>/h
- 淡水化量 40,000 t/d



### GTHT300Cの需要基数

UAE、クウェート、サウジアラビアの各国の電気/海水淡水化需要の1/3をGTHT300Cから供給すると仮定



水素は中東で利用してもよいし、日本への輸入も可能

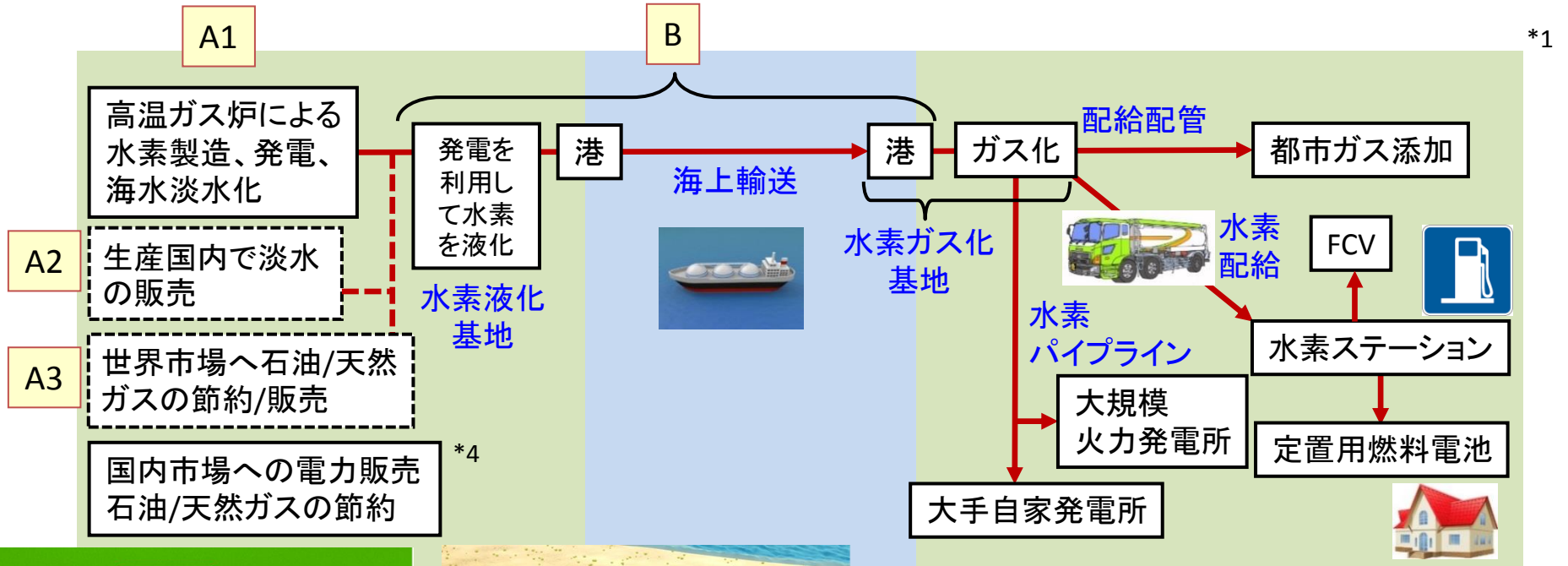
# 中東からの水素輸入

中東に高温ガス炉システムを建設し、電力、淡水は地元で販売、水素は日本に輸出

生産国(サウジアラビア、アラブ首長国連邦等)

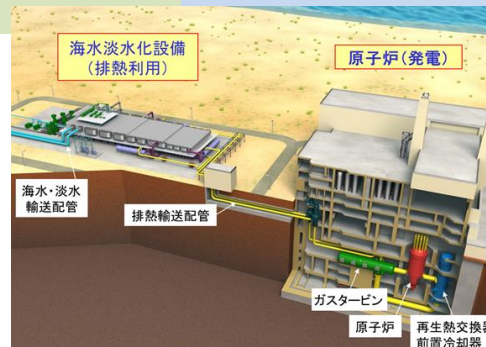
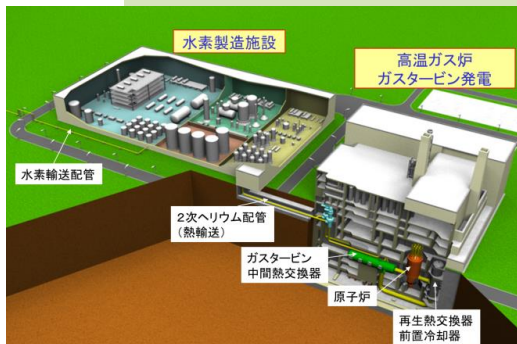
日本(沿岸)

日本(内陸)



\*1

\*4



$A1 = 23.4^{*2} \text{ 円/Nm}^3$   
 $A2 = 1.3 \text{ 円/Nm}^3$   
 $A3 = 7.2 \text{ 円/Nm}^3 \text{ (ガス)}$   
 $B = 11.5^{*3} \text{ 円/Nm}^3$

**輸入コスト (A1-A2-A3) + B = 26.4 円/Nm<sup>3</sup>**

石油の場合は  $A3 = 12.6 \text{ 円/Nm}^3$   
**輸入コスト: 21.1 円/Nm<sup>3</sup>**

参考資料: \*1 三菱商事(株)、「水素サプライチェーンの実現に向けて」、水素・燃料電池戦略協議会向けプレゼンテーション資料、2014年4月。

\*2 原子力機構試算

\*3 川崎重工(株)、「低炭素社会に向けた水素チェーンの実現可能性検討」、Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol.35 No2, 2014

\*4 発電による石油/天然ガスの節約による利益はホスト国と事業会社で分割するとし、水素コストの割引に使用していない

## 日本・UAE高温ガス炉研究協力技術フォーラム

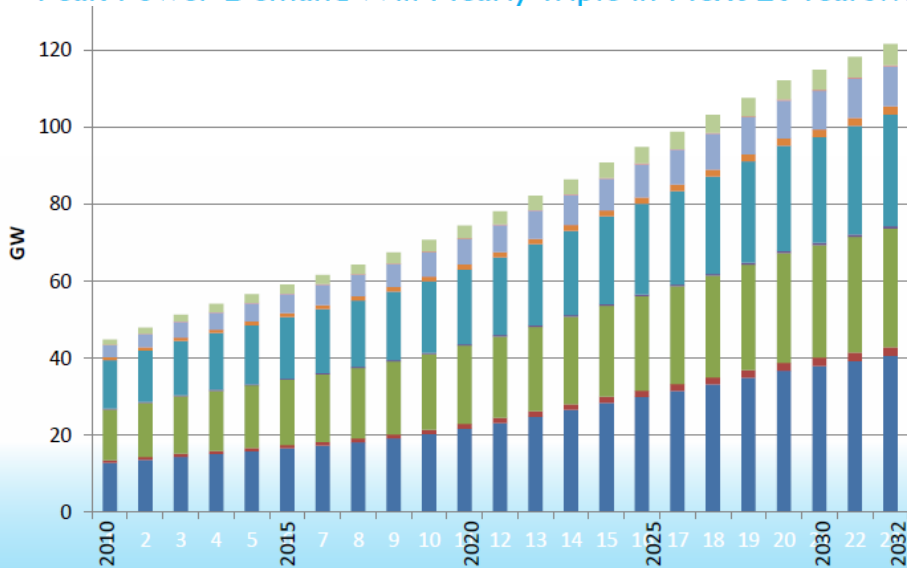
**Japan and UAE Joint Forum on Multipurpose High Temperature Gas-cooled Reactor-**

1. テーマ:『日本・UAE高温ガス炉研究協力技術フォーラム』  
**Japan and UAE Joint Forum on Multipurpose High Temperature Gas-cooled Reactor**
2. 日本側主催: 一般社団法人日本技術者連盟(JEF) : 団長 東京大学 岡本教授
3. UAE側協力団体 : **University of Sharjah(UAE)**
4. 調査期間及び開催場所:  
2016年2月26日(金)～3月1日(火)5日間  
**【会場】2016年2月28日(日)アラブ首長国連邦Sharjah大学**  
**【現地視察】2016年2月29日(月)**
5. 後援(日本側) :  
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
一般財団法人エネルギー総合工学研究所

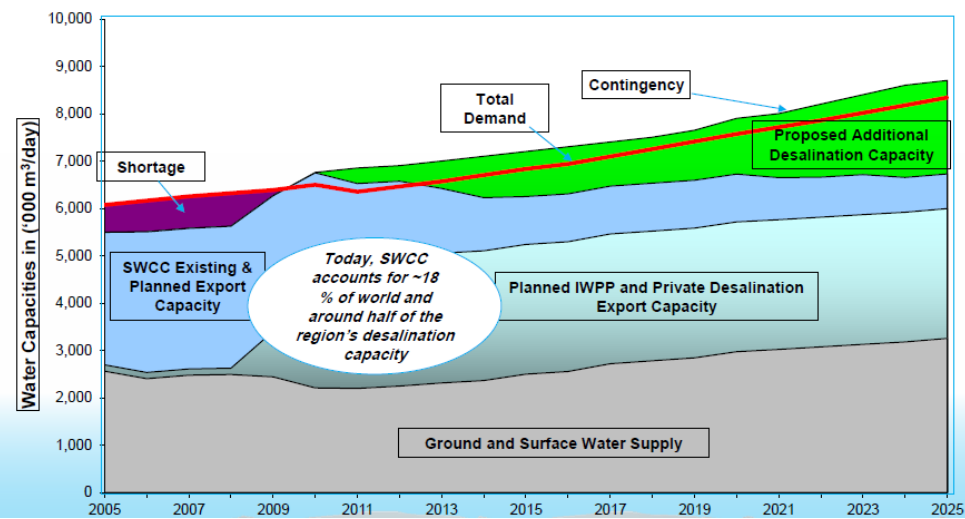
# 参考資料

- 人口：25 百万人 (2014)
- 発電プラント数79基 (約55GW)  
(石油55%, 天然ガス44%)
- 水需要  
6.5百万トン/日  
需要量のうち、60%が海水淡水化で製造  
需要量は年間7%以上上昇

Peak Power Demand Will Nearly Triple in Next 20 Years...



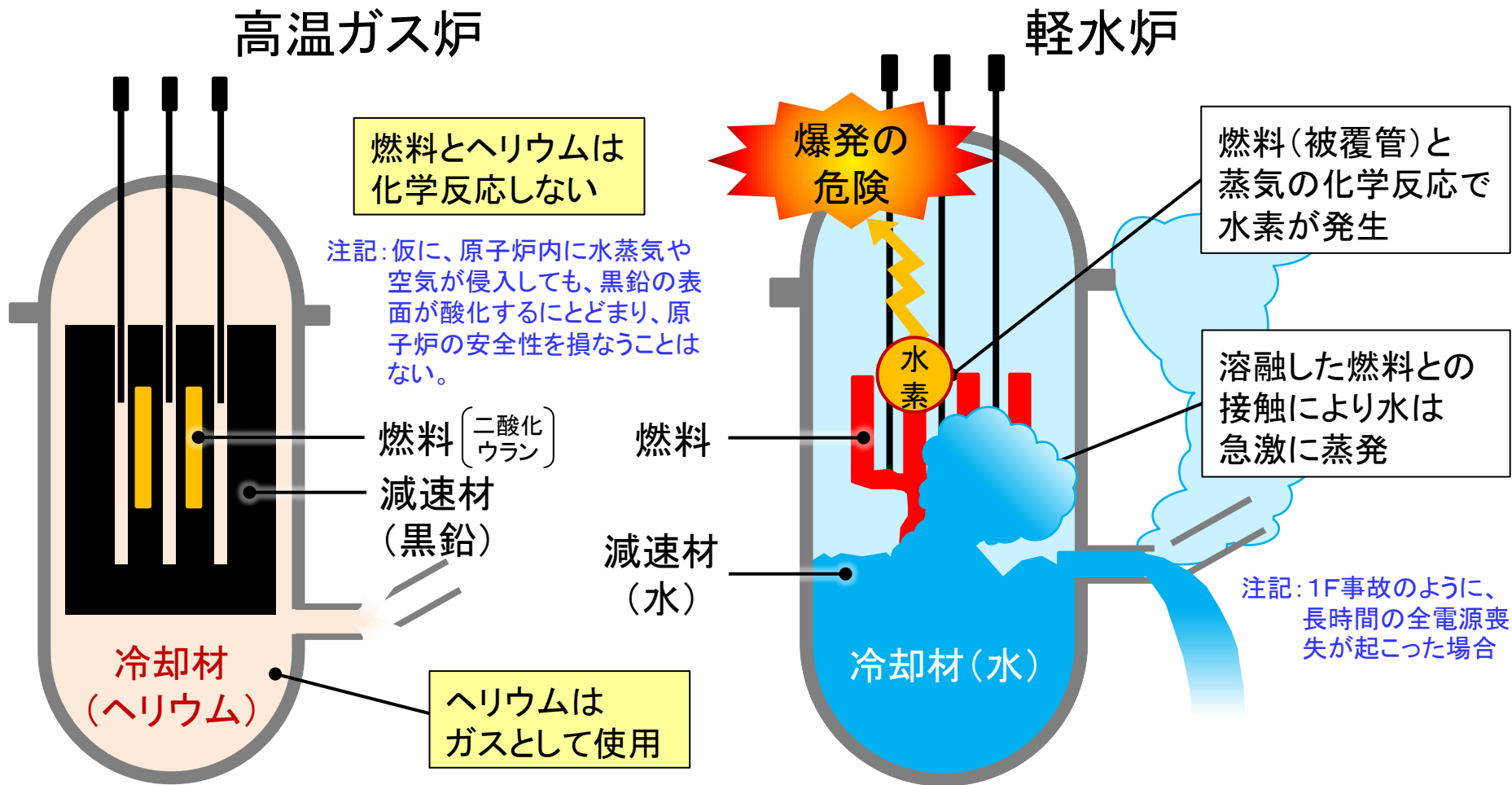
KSA Total Water Demand Versus Planned Supply Sources



参考資料：KACARE、2014年6月。

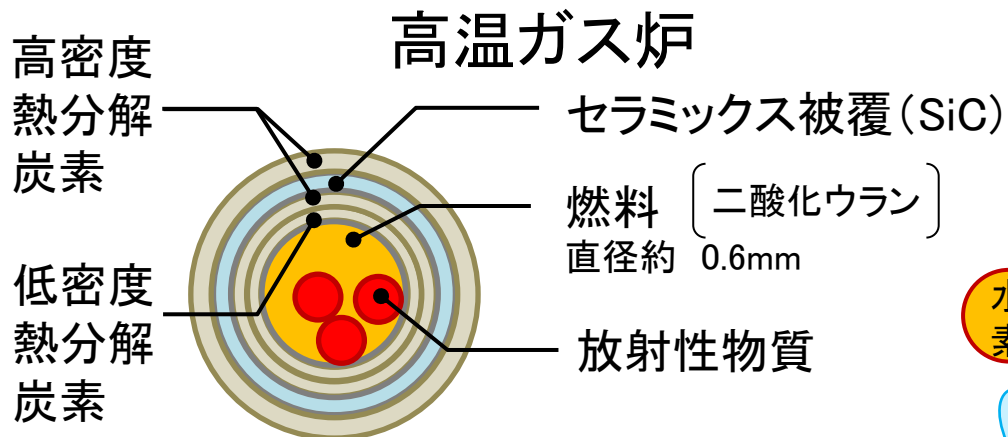


## 冷却材に不活性なヘリウムを使用



水素爆発・水蒸気爆発が発生しない

## 燃料の被覆に耐熱性に優れたセラミックスを使用

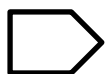


放射性物質の放出が顕著になる温度は約2200°C  
(1600°Cまで再利用可能)

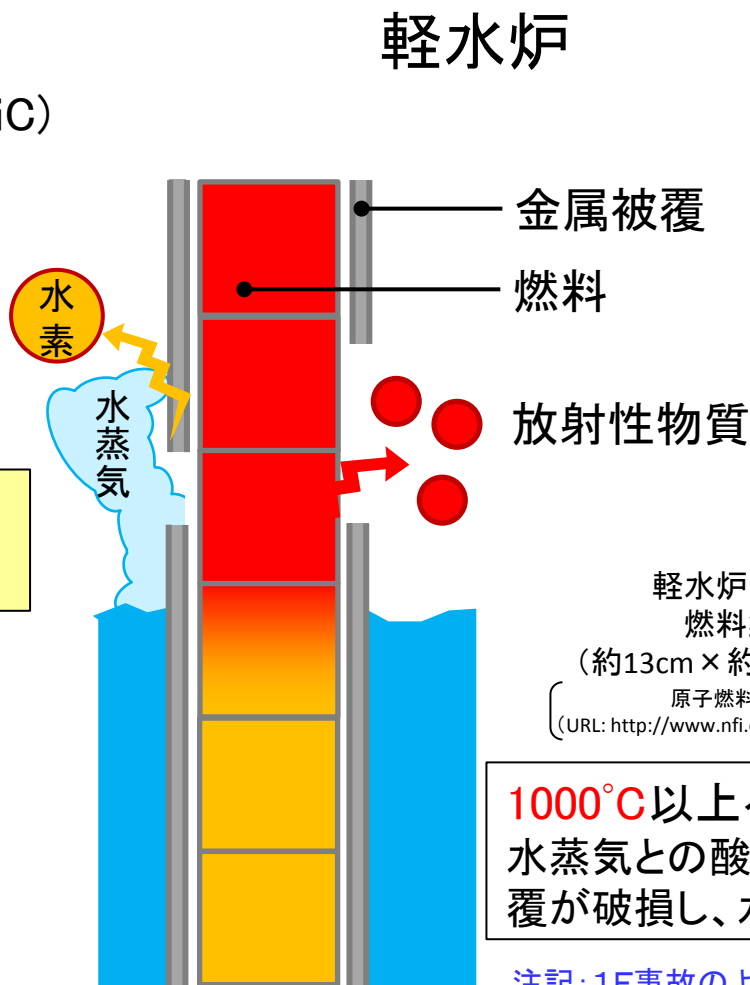
高温ガス炉は冷却材喪失事故時においても、原子炉は自然に冷却され、燃料温度は1600°Cを超えない。



被覆燃料粒子  
(直径: 920μm)



燃料コンパクト  
(外径: 26mm、高さ: 39mm)



軽水炉(BWR)の  
燃料集合体

(約13cm × 約13cm × 約4m)

原子燃料工業(株)HPより

(URL: <http://www.nfi.co.jp/product/prod02.html>)

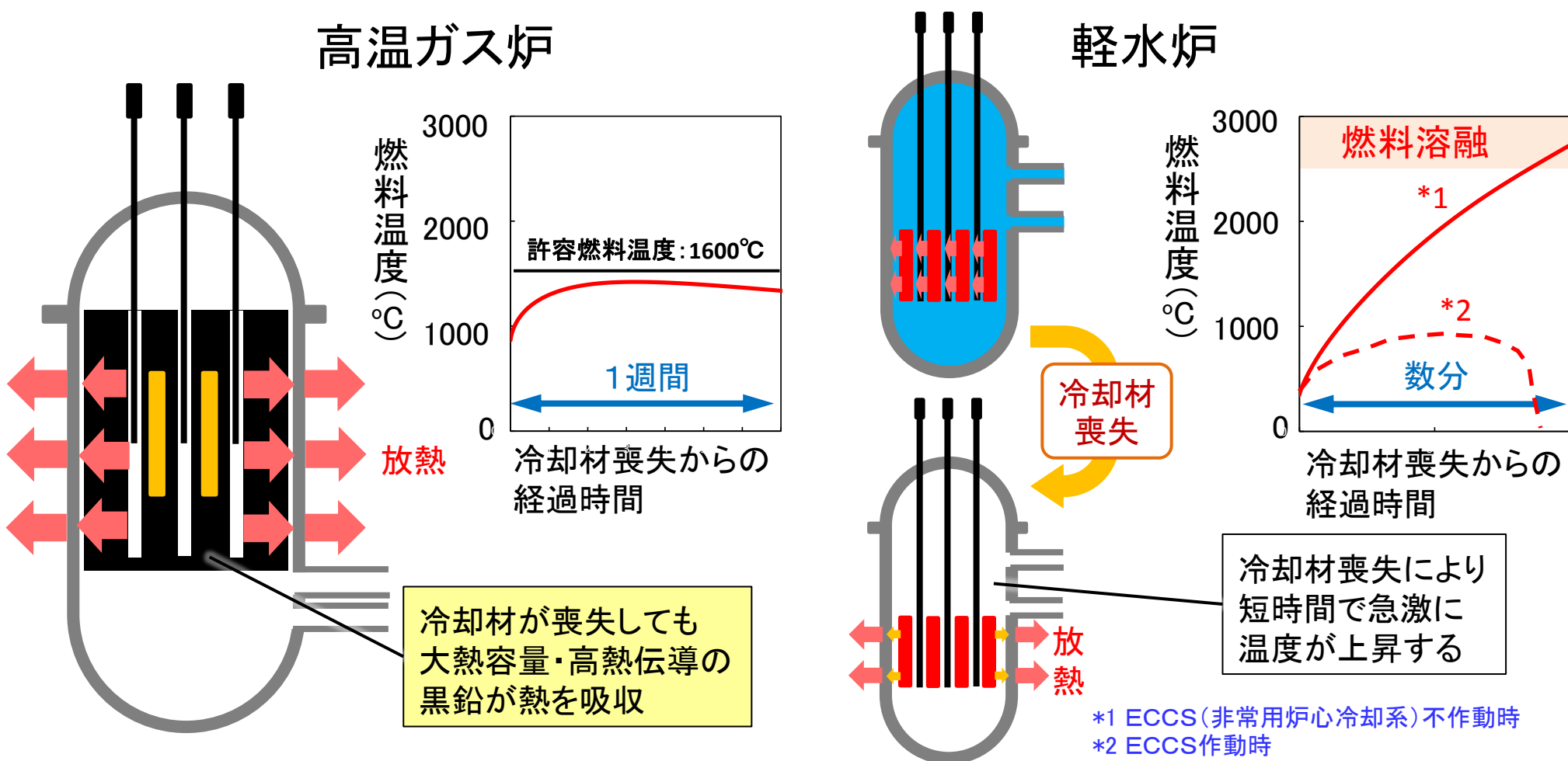
1000°C以上へ温度上昇し、  
水蒸気との酸化により金属被  
覆が破損し、水素を発生する

注記: 1F事故のように、長時間の全電  
源喪失が起こった場合



燃料溶融しない

## 黒鉛(減速材)により事故時の温度変化が緩慢



事故後(短時間)の対応の必要がない

## 高温ガス炉



燃料ブロック  
燃料(燃料コンパクト、スリーブ)

### 使用済燃料

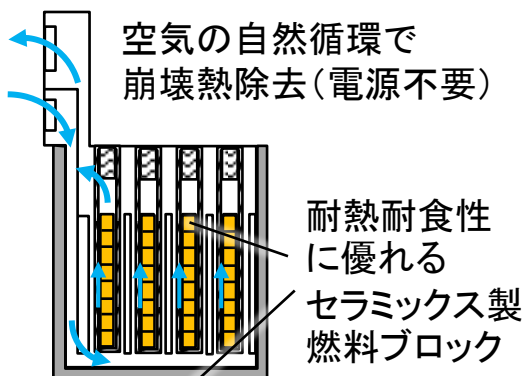
**発生量は軽水炉の約1/4**

高燃焼度: 120GWd/t  
高効率発電: 47%

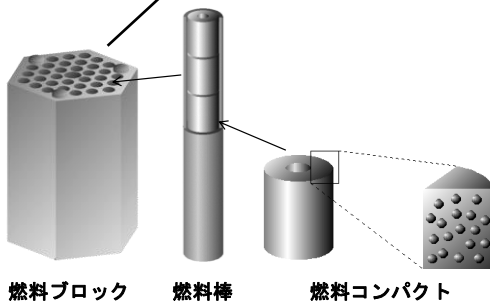
### 中間貯蔵

#### 優れた安全性

空気の自然循環で  
崩壊熱除去(電源不要)



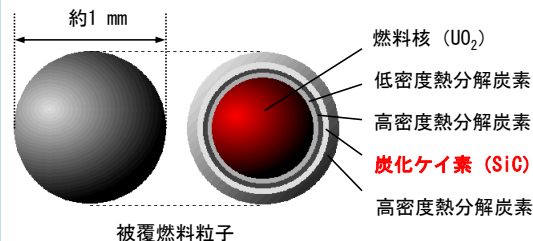
耐熱耐食性に優れる  
セラミックス製  
燃料ブロック



燃料ブロック 燃料棒 燃料コンパクト

### 直接処分

#### 優れた化学的安定性

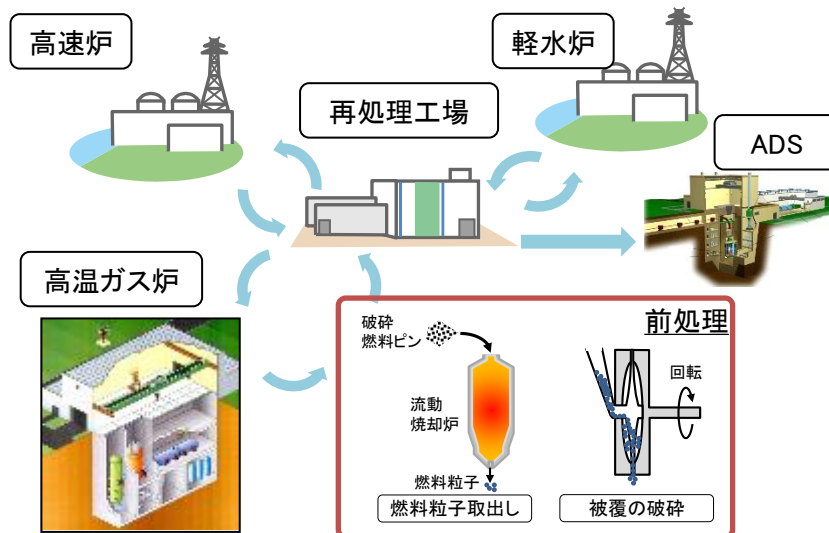


SiC被覆層の優れた健全性

将来の原子力政策に柔軟に対応

### 高速炉(FR)、軽水炉サイクル等と接続

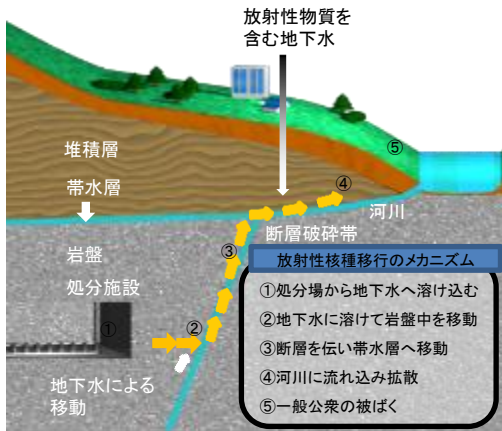
#### 簡単な前処理の追加のみで可能



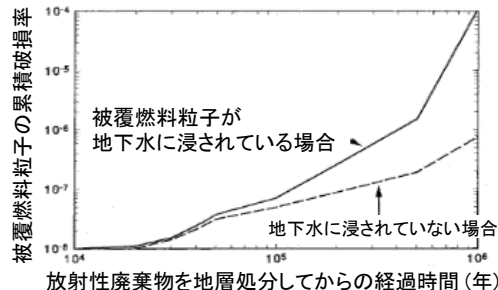
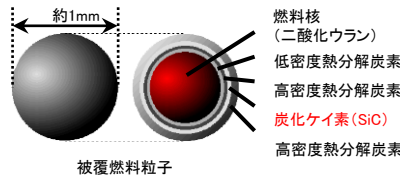
[1] 原子力委員会 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会 (第9回), 核燃料サイクルの技術選択肢及び評価軸について.

# 廃棄物の処理処分

## 使用済燃料処分(直接処分)



地層処分では漏えい放射能による被ばくが自然からの被ばく(900-1,200  $\mu$  Sv/年)よりも十分に小さいこと(100-300  $\mu$  Sv/年)が求められる。



- $\alpha$ 崩壊により発生するHeガス( $\alpha$ 線はHeの原子核)により内圧が上昇するため、被覆燃料粒子は年月が経過するほど破損率が上昇
- 地下水環境ではSiC層の腐食によりさらに厳しい
- 使用済被覆燃料粒子が処分場において地下水に浸されても、SiCの優れた耐食性により100万年後の破損率は $10^{-4}$ 程度 \*1
- 高レベル廃棄物(ガラス固化体)を保護する金属製のオーバーパックは1000年程度、地下水との接触を防止 \*2
- 高温ガス炉の使用済燃料は、数十万年レベルで放射性物質が地下水に溶け出すことを抑制し、一般公衆の被ばくを十分小さくできる。

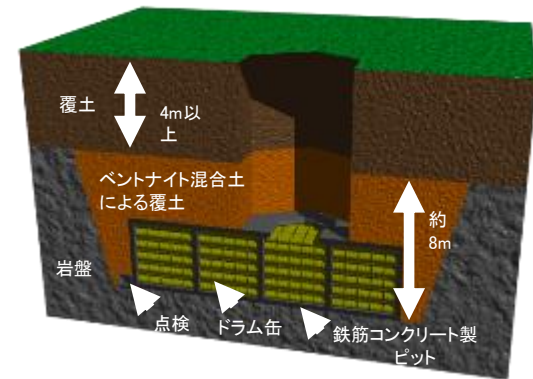
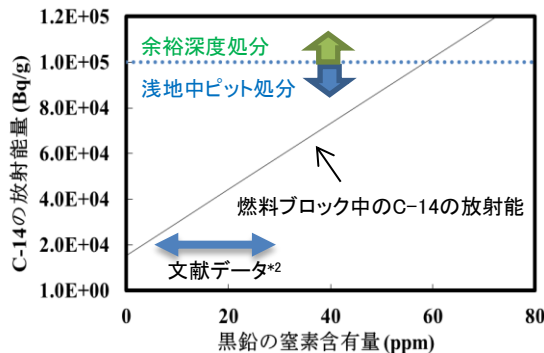
\*1 Deep-Burn: making nuclear waste transmutation practical, NED 222 (2003).  
\*2 わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, JNC TN1400 99-020.

## 黒鉛埋設処分

- 実用高温ガス炉1基当たりの黒鉛廃棄物の量は、60年間でも50mプール約2杯分程度である。
- 黒鉛廃棄物は、窒素から生成されるC-14(半減期約5730年)の放射エネルギーにより、低レベル放射性固体廃棄物として浅地中ピット処分又は余裕深度処分に分類される。
- 廃棄物埋設地の管理期間(約300年)終了後は、一般的な土地の利用が可能になる。

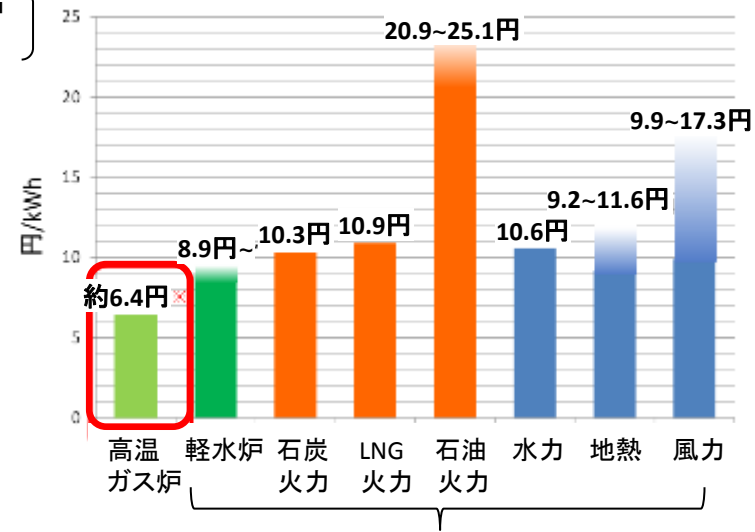
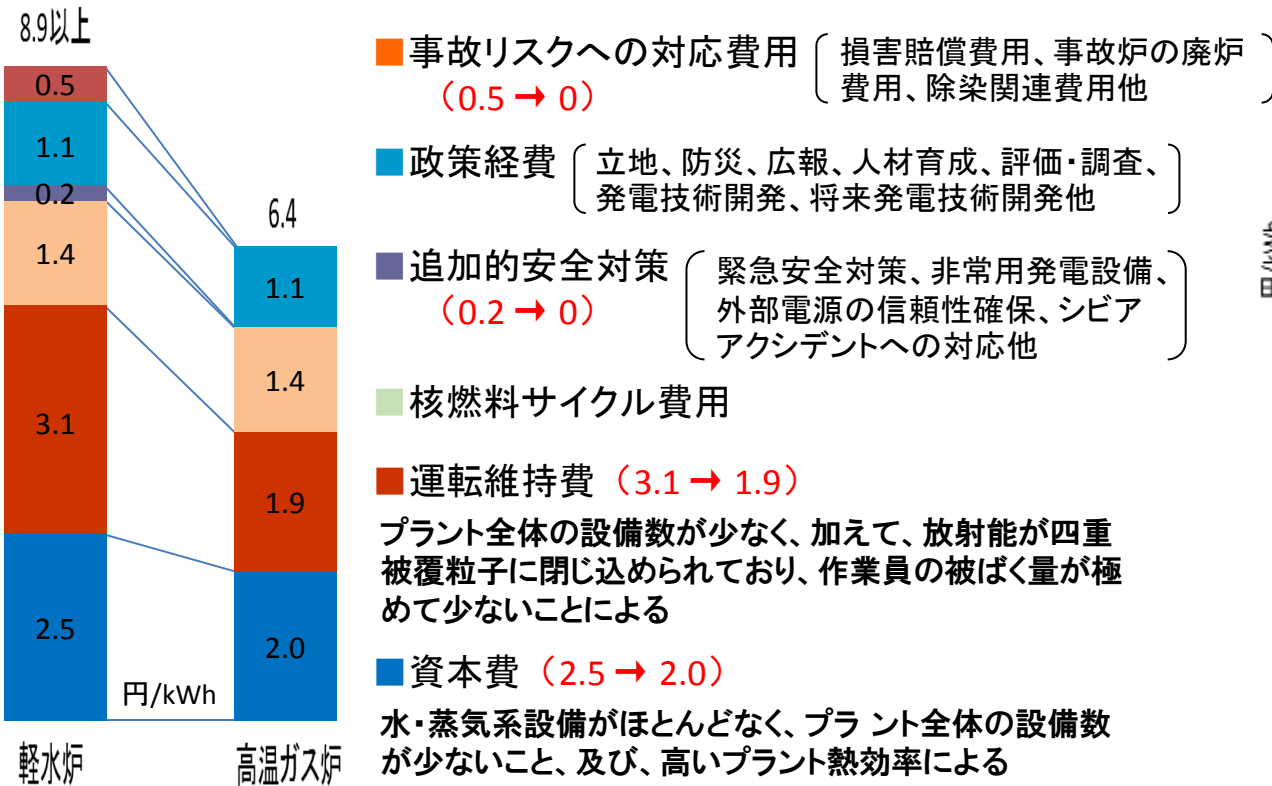
対象とする原子炉	実用高温ガス炉
交換する黒鉛ブロック数(体/4年)*1	1,344
交換する黒鉛ブロック体積(m <sup>3</sup> /4年)	205
運転期間(年)	60
60年での黒鉛廃棄物量(m <sup>3</sup> )	3080
50mプールの容積(m <sup>3</sup> ) (50m x 20m x 1.5m)	1500

\*1 JAEA-Technology 2008-007  
\*2 JAERI-Review 2002-034  
\*3 資源エネルギー庁ホームページ <http://www.enecho.meti.go.jp/>



- コンクリートピットの中に放射性廃棄物を定置した後、セメント系充填材を流し込んで一体的に固める。\*3
- ピットの周囲は地下水を通しにくい粘土で囲い、ピットへの地下水の浸入を防ぐ。\*3

## 発電コストの比較



エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会編  
 コスト等検証委員会報告書(平成23年12月19日)より

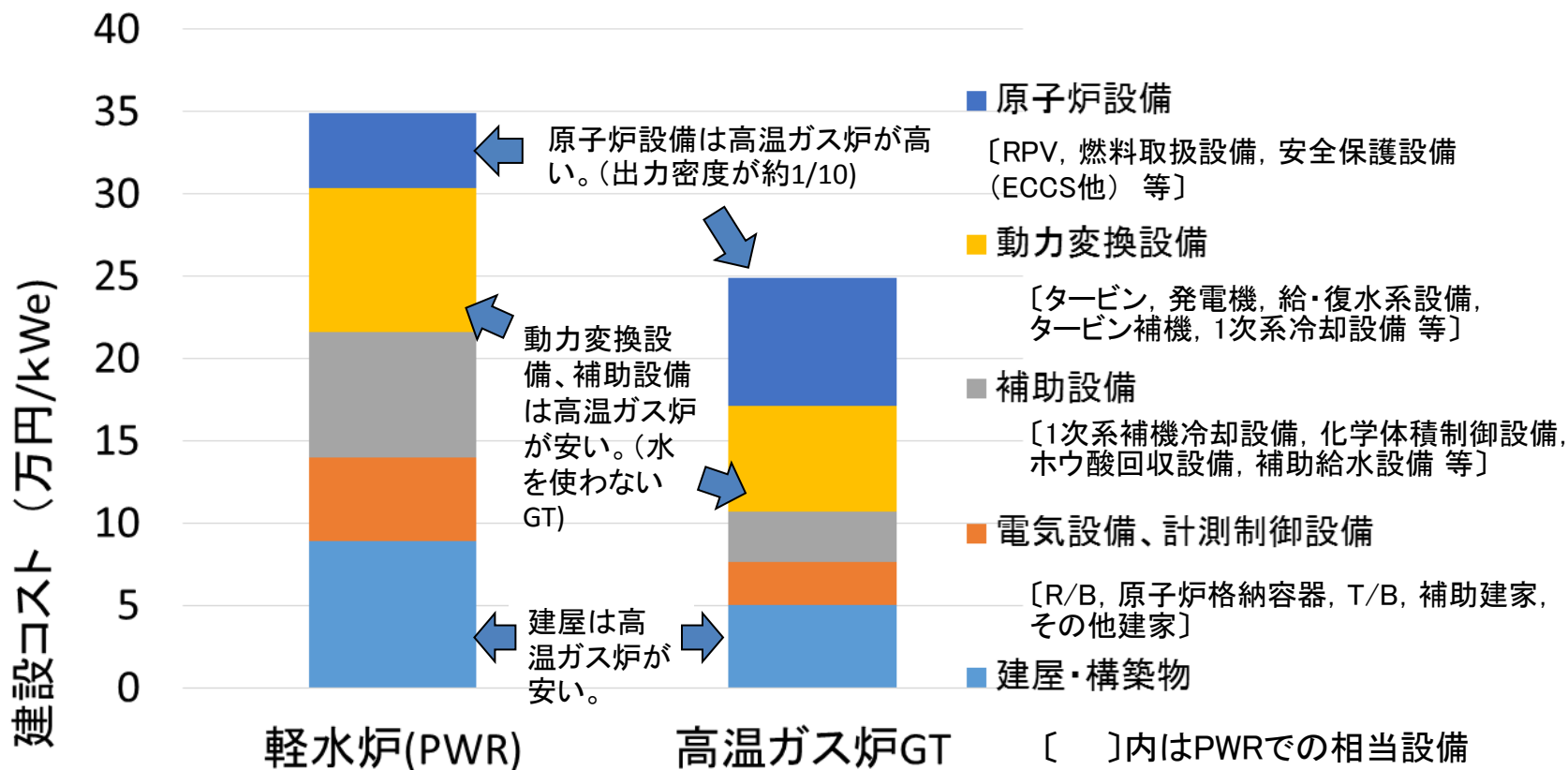
高温ガス炉が持つ、高いプラント熱効率、放射能の閉じ込め能力、優れた固有安全性を最大限に活用することにより、

- 事故リスクへの対応費用、追加的安全対策 が不要
- 運転維持費、資本費 が削減

**高温ガス炉:**  
**約6.4円/kWh**※

※原子力機構推計

# 建設費



**原子炉設備は高温ガス炉が高い。動力変換設備、補助設備、建屋等は高温ガス炉が安い。発電効率は高温ガス炉が10%以上高い。**

- ・軽水炉の建設コストは、エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会編 コスト等検証委員会報告書(平成23年12月19日)
- ・内訳については、米国のEEDB報告の内容を参考に決定。
- ・高温ガス炉GTは2006年のコスト評価結果を元に、軽水炉と同じ増加率で補正

# 高温ガス炉水素製造システムの経済性

国内生産が可能で、様々なエネルギー源から製造される水素の経済性を評価

- 化石燃料(都市ガス、A重油、LPG、石油(ナフサ)) + 改質
- 再生可能エネルギー(風力、太陽光) + 水電解
- 副生水素: 苛性ソーダ、コークス炉ガス
- 原子力: 高温ガス炉+ISプロセス

## 評価対象 \*1

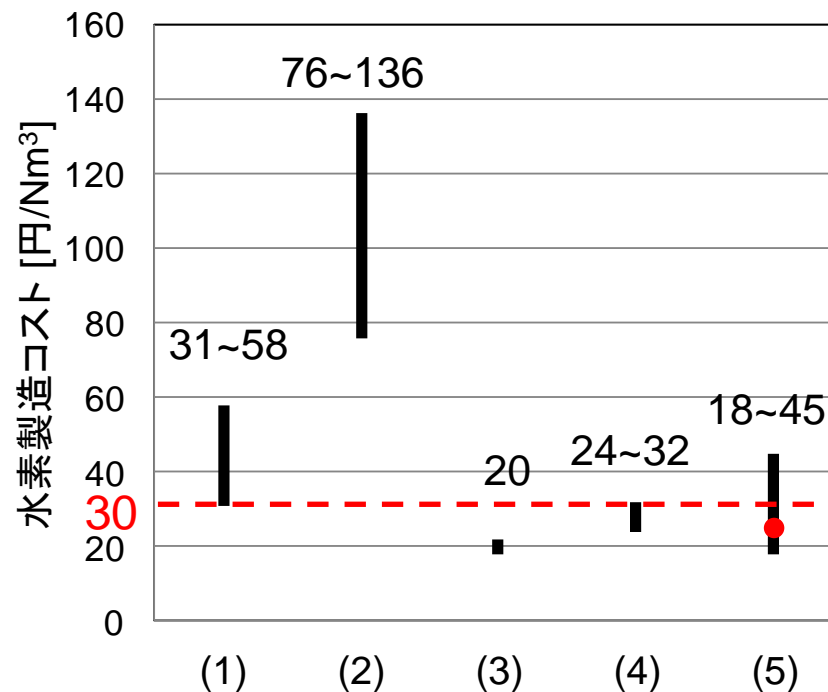
- (1) 化石燃料等改質 \*2
- (2) 再生可能エネルギー・水電解 \*3
- (3) 副生水素(苛性ソーダ)
- (4) 副生水素(コークス炉ガス)
- (5) 高温ガス炉水素製造 \*4

\*1: 資源エネルギー庁燃料電池推進室、水素・燃料電池戦略協議会  
ワーキンググループ(第5回) -配布資料、平成26年4月14日

\*2: 改質器の設備費等は含まない

\*3: 電解装置の設備費、送電コスト等は含まない

\*4: 原子力機構試算

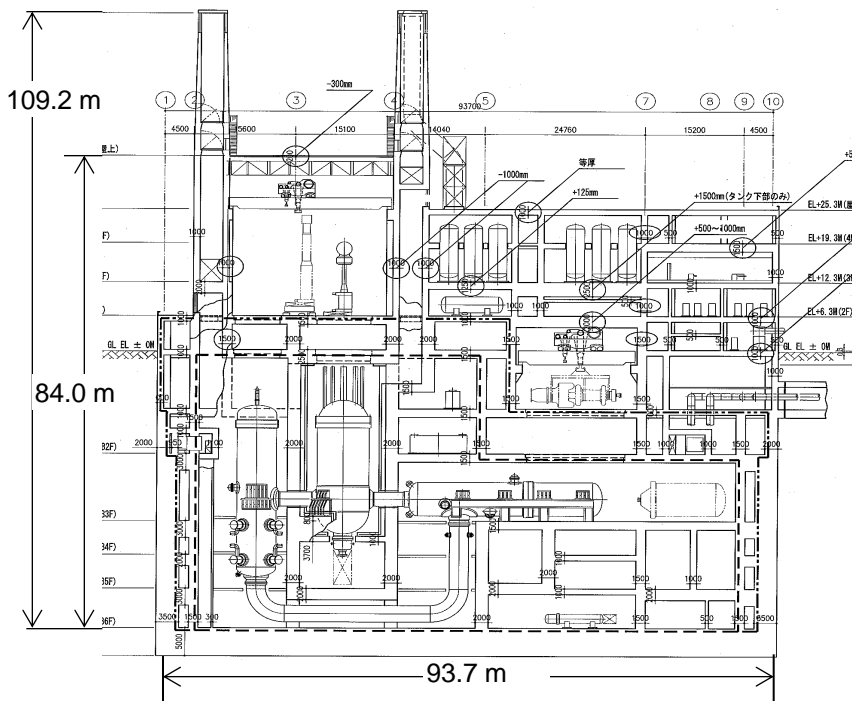


高温ガス炉水素製造は、他の水素製造法と競合可能であり、水素・燃料電池戦略ロードマップで提示された2020年代後半にプラント引渡し目標コスト30円/Nm<sup>3</sup>程度に対応可能

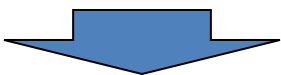


# 建屋の大きさ

## 【GTHTR300 (275MWe x 4)】



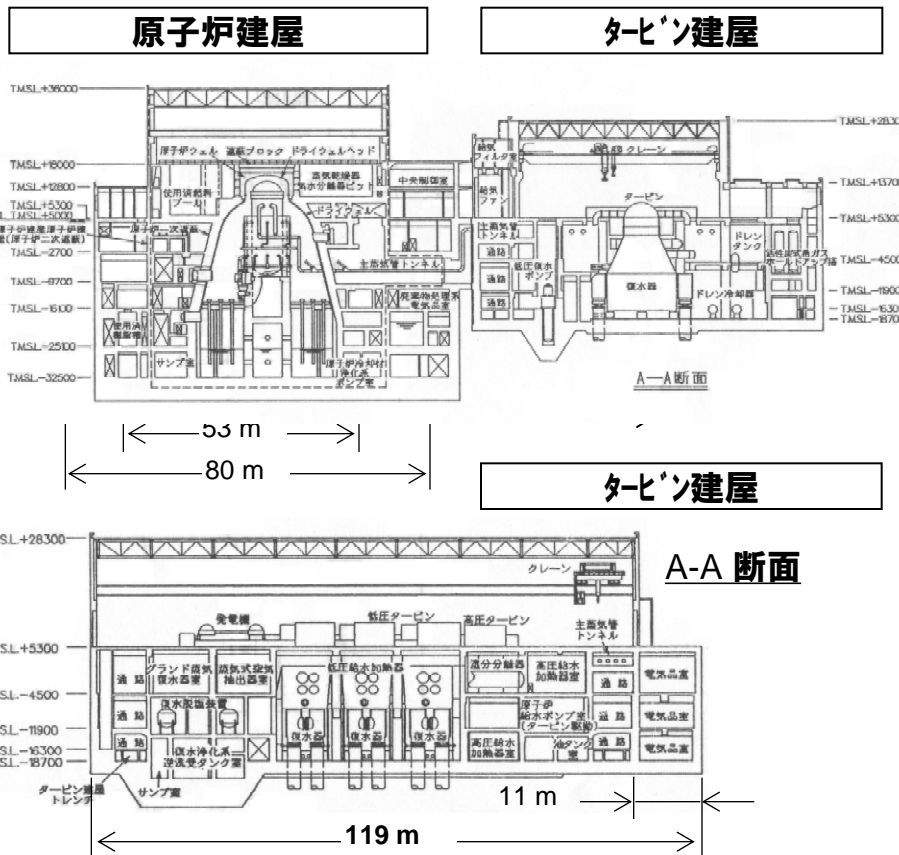
★建屋容積：533,000 m<sup>3</sup>



建屋容積はBWR-5の79%

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

## 【BWR-5 (1100MWe)】



★建屋容積：674,000 m<sup>3</sup>

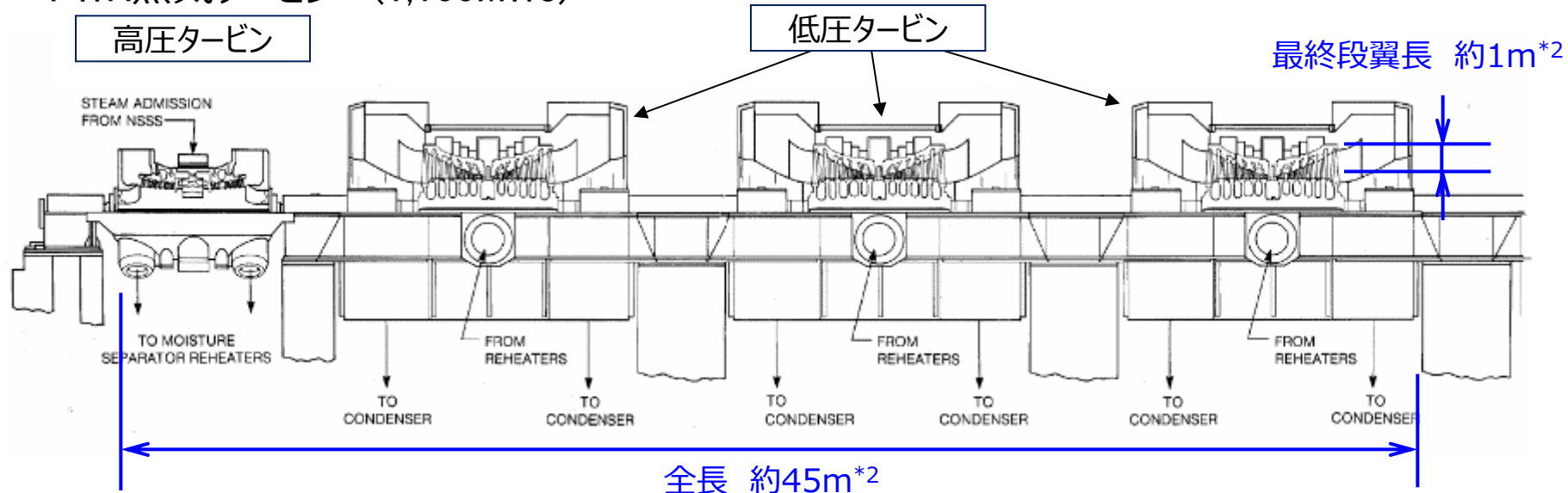
- 原子炉建屋：354,000 m<sup>3</sup>
- タービン建屋：320,000 m<sup>3</sup>

※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

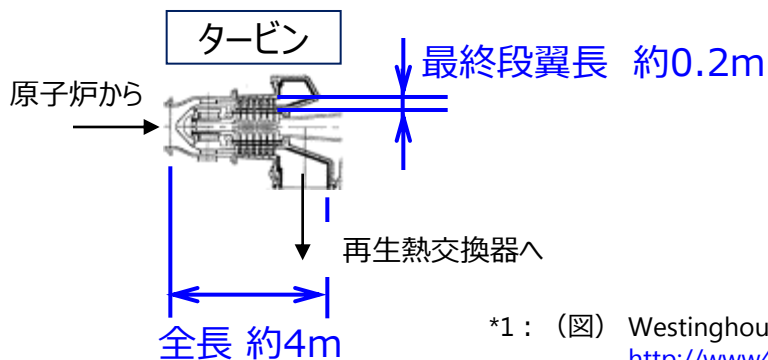
建屋が小さい。

# ヘリウムタービンと蒸気タービンの大きさ比較

## PWR蒸気タービン\*1 (1,100MWe)



## ヘリウムタービン (300MWe)



- 高圧ヘリウムを作動流体とするため、体積流量が小さいヘリウムタービンは蒸気タービンに比べ小型で軽量
- タービン入口温度が小さく、定圧比熱が大きいヘリウムガスを作動流体とするヘリウムタービンは蒸気タービンに比べ翼長が小さい

\*1 : (図) Westinghouse, the westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant , [http://www4.ncsu.edu/~doster/NE405/Manuals/PWR\\_Manual.pdf](http://www4.ncsu.edu/~doster/NE405/Manuals/PWR_Manual.pdf), アクセス日 2014年12月15日.

\*2: 原子力安全研究協会, 軽水炉発電のあらまし、平成4年10月.

**ガスタービンはコンパクト。水系も不要**