

原子力学会2013年秋の大会、総合講演・報告-5; 「高温ガス炉の課題と解決法
(安全性、経済性、持続可能性)」 (2013年9月4日、青森県八戸工大)

高温ガス炉の経済性

(その安全性、高温性、協働性などが大きな
経済メリットを創出。経済性は価値観)

2013年9月

工学院大学
高温ガス炉プラント研究会(RAHP)
元 日本原子力発電

土 江 保 男

<目 次>

(ページ)

1. 概要	3
2. 炉プラント構成と経済性	4
3. 安全性と経済性	5
4. 高温性、持続性、環境性、協働性、国際性と経済性	7
5. 開発コスト、建設コスト、運転&維持コストと変動対応	10
6. 経済性まとめ	15

<付 録>

各国の高温ガス炉開発背景&視点(エネ、環境、経済..)	16
-----------------------------	----

1. 概 要

- ここで「高温ガス炉」とは、TMIやチェルノビル原発過酷事故発生後の1990年代に登場した出力密度抑制型の「**小型モジュール式高温ガス炉**」を指す
- この炉プラントの特質は、そのユニークな高温性、高い安全性、持続性、柔軟性、環境性、協働性、核拡散抵抗性、膨大な潜在市場性など
- これらの特質は大きな経済メリットを創出
- これらを背景に、現在、先進国、需要国、資源国などが、その開発、実証、実用化に鋭意取り組み中
- エネ・環境事案の「経済性」は、国家的・国際的な戦略的価値観で決まる
- 今後、その本格的な実用化を図っていくためには、安全性などその特質の一層の磨き上げ、総合的な経済性の実証、国家ビジネス戦略的な取り組み、推進が望まれる

2. 炉プラント構成と経済性

(高温 & 安全なシステム⇒出力は小型～大型と柔軟⇒**様々な経済メリット**)

(Md:モジュール、 U:ウラン、Pu:プルトニウム、Th:トリウム)

(◎、○: **経済メリット**、 ×: **経済デメリット**)

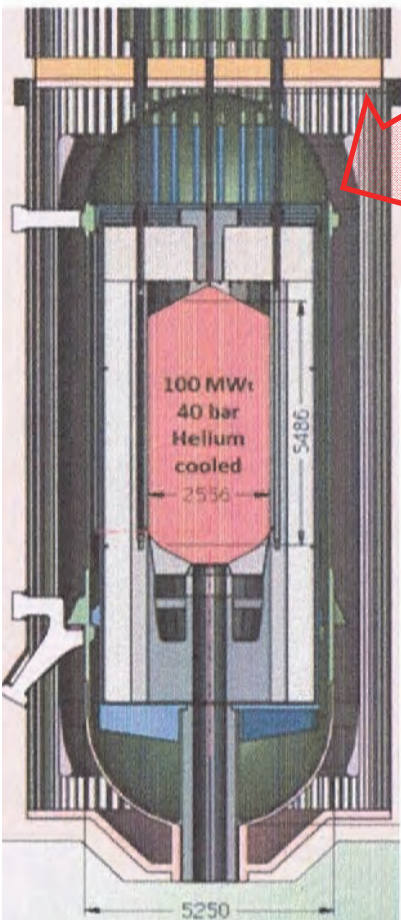
	(軽水炉)	<u>小型Md式高温ガス炉</u>		経済性
システム 構成	原子炉系 ＋発電系	原子炉系＋発電系 ＋ 熱利用系	・需要性大、柔軟性大	○
燃料/ 被覆材	U、Pu系/ Zry(合金、 一重被覆)	U、Pu、 Th系 / C、SiC (炭素系、 多重被覆)	・資源豊富なThも利用可 (資源持続性)。多重被覆で 放射能を格納(安全性)	○
減速材/ 構造材	軽水/鋼鉄	黒鉛	・耐熱性。沸騰、溶融、水素 発生等が生じない(安全性)	○
冷却材/ 出口温度	軽水/ ～300℃	Heガス / 700～1,000℃	・不活性。相変化がない ・高温～低温まで広範・多様 な熱利用可	○
Md出力/ プラント 出力(例)	10～150万 kWe	3～30万kWe/ 3～300万kWe	・Md出力は小型だが、 プラント出力は需要に応じ、 小型～中型～大型と柔軟 に選択可	○

3. 安全性と経済性

(低出力密度⇒**経済デメリット**。一方、それにより得られる高い安全性
⇒簡素化・標準化・モジュール化設計⇒**大きな経済メリット**)

	経済性
<u>炉心安全設計&標準化・モジュール化設計</u>	◎
・ 低出力密度 (黒鉛減速炉で、出力密度は基本的に低いですが、小型モジュール式炉設計では、それを過酷事故(SA)を生じないレベルにまで更に抑制)	×
⇒ 受動安全性(Passive Safety)、固有安全性(Inherent Safety)確実化 ⇒工学的安全施設(緊急時炉心冷却系(ECCS)、高圧注入系...)不要 ⇒設備簡素化、標準化、モジュール化⇒設計コスト、許認可コスト低減 ⇒工期短縮化、建設コストが低減 ⇒需要地近接立地が可(電力、熱の輸送コスト大幅低下)	◎
⇒需要(量、内容)に応じた柔軟プラント設計(マルチ・モジュール設置)可	○
⇒量産効果、習熟効果(大型炉に比べて数倍の速度で効果)	○
⇒初期投資の抑制&早期回収が可	○

TH-100 Pebble bed Reactor
100 MW Thermal
Core volume = 26m^3
Power density = $3.8\text{MW}/\text{m}^3$

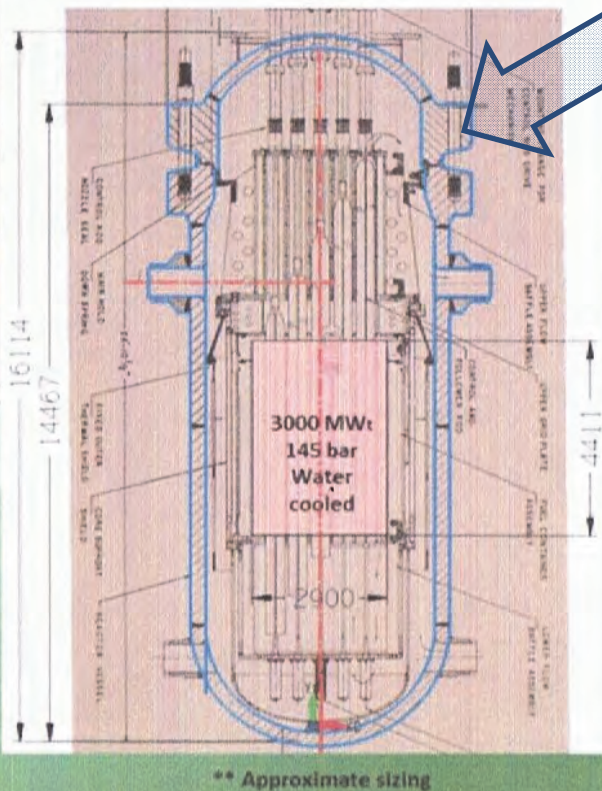


小型モジュール式高温ガス炉

(南アTH-100ペブルベッド炉の場合)

- ・炉心容積: 26m^3
- ・出力: $100\text{MWt}/35\text{MWe}/\text{Md}$
- ・出力密度: $3.8\text{MW}/\text{m}^3$

Light Water Reactor
3000 MW Thermal
Core volume = 30m^3
Power density = $100\text{MW}/\text{m}^3$



大型軽水炉

- ・炉心容積: 30m^3
- ・出力: $3,000\text{MWt}/1,000\text{MWe}$
- ・出力密度: $100\text{MW}/\text{m}^3$

小型モジュール式 高温ガス炉

- ・図体は“大”、炉心出力は“小”
(出力密度は軽水炉の $1/10 \sim 1/20$)
⇒ 炉心コストで大きな経済デメリット
⇒ 一方で高い安全性を獲得
⇒ より大きな経済メリットを獲得

(出典) "The STL TH-100 Thorium Generator", E.Mulder, 2012.10.28

<説明加筆>

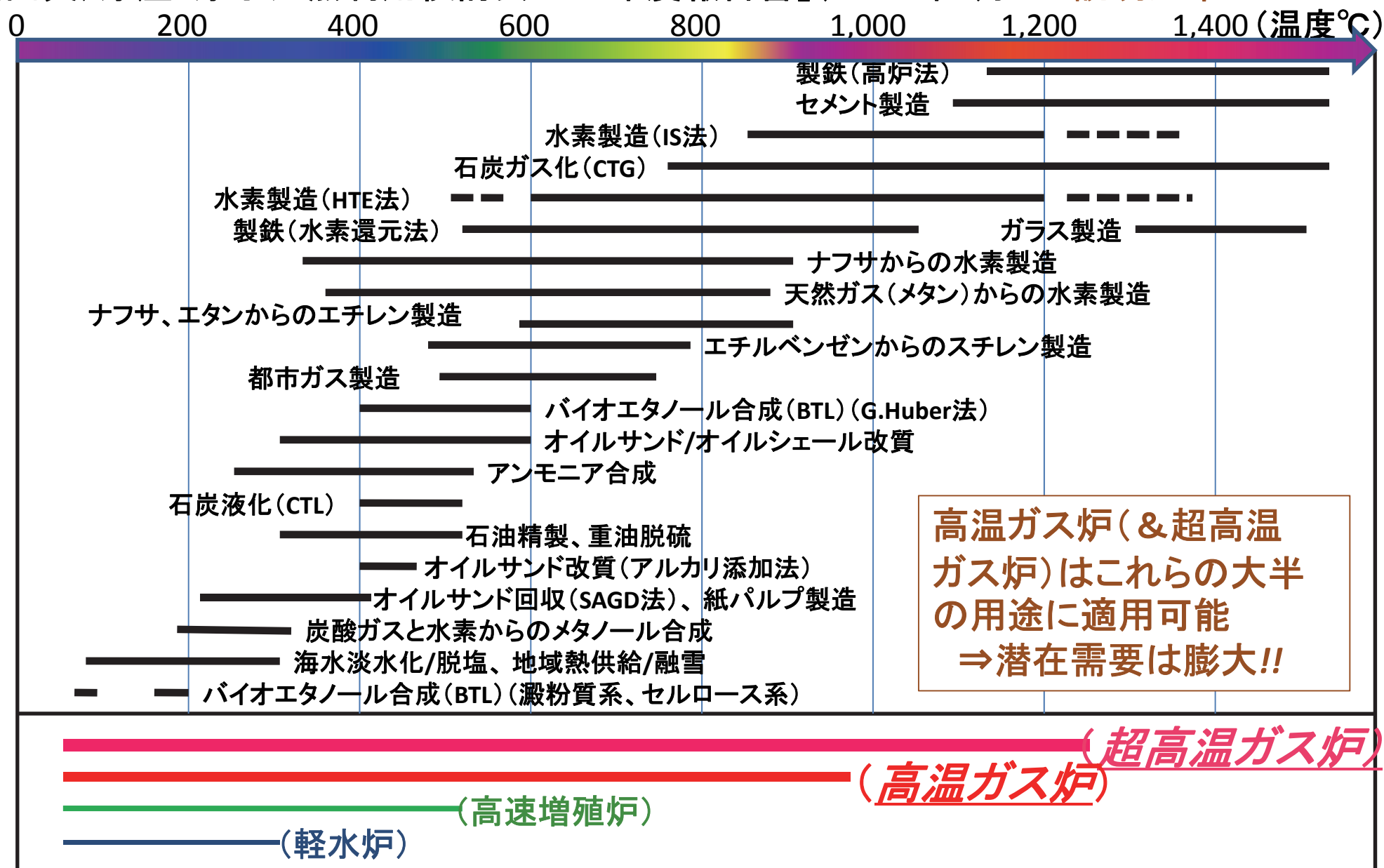
4-1. 高温性、持続性、国際性と経済性

(現行のプロセス熱利用産業の大半に当該炉の組合せ適用が可、
燃料資源も豊富に存在 ⇒ 世界規模で膨大な潜在需要 ⇒ 経済メリット)

	経済性
高温性 (高効率性、大量 & 高効率水素製造、多様なプロセス熱利用性)	◎
・高温～低温熱利用(1,000～100℃): 高効率ガスタービン発電、蒸気タービン発電、水素製造(水素還元製鉄、燃料電池(FC)(航空、自動車(FCV)・・)、燃料合成(CTG、CTL、BTL・・)、アンモニア製造、海水淡水化・・	○
持続性 (燃料資源の種類と量、高速増殖炉(FBR)への繋ぎ性)	◎
・Puの高効率燃焼が可、U資源の補足・代替としてTh資源利用が可	○
・ガス冷却高速炉(GFR)への繋ぎ可	○
国際性 (次世代性、国際需要性、国際開発性)	◎
・「第4世代炉要件」(持続性、安定性、安全性、経済性、水素製造性、核拡散抵抗性・・)をいずれも満足 ⇒ 国際開発対象候補の1つとして選出済	○
・先進国(米、欧、日・・)、大需要国(米、中、・・)、資源国(南ア、カザフ・・)などが、国家エネ・環境・経済戦略の一環として、単独で、あるいは国際協力・連携しながら、開発、実証、実用化に取り組み中	○

原子力熱利用の潜在的用途/温度範囲/適用可能炉型

(出典) 原産「原子力熱利用検討会2008年度報告書」、2009年3月 <説明加筆>



4-2. 環境性、協働性と経済性

(CO₂発生無し。化石燃料やバイオ燃料との協働(シナジー)によりCO₂発生低減
⇒外部(環境)コスト負担が大幅低減 ⇒**経済メリット**)

	経済性
環境性、協働性、スマート性 (熱利用効率向上、排熱利用、クリーンエネ製造、放射性廃棄物低減。既存プロセス熱利用産業(石炭や天然ガスの燃焼熱を利用⇒CO ₂ 大量放出)との協働(Synergy)⇒CO ₂ 放出大幅低減。⇒「水素エネ社会」、「スマートエネ社会」への合流性	◎
・(ガスタービン発電の場合)発電効率が大(40～50%)	○
・(発電＋熱利用)総合熱利用効率が大(70～80%)	○
・大量＆高効率水素製造⇒水素発電、水素還元製鉄、燃料電池自動車(FCV)、肥料製造、・・	○
・排熱(～200～100℃)利用 ⇒地域熱供給(暖房、融雪・・)、海水淡水化	○
・高燃焼度利用によりワンスルー型(直接処分型)燃料サイクルが可、長半減期核種(Pu、TRUなど)低減も可	○
・石炭ガス化＆液化(CTG&CTL)、バイオマス液化(BTL)、石油精製・・	○
・「水素エネ社会」、「スマートエネ社会」(クリーンエネ(電気/水素/熱)を合理的、一体的に管理、供給するシステム社会)への合流性	○

5. 開発コスト、建設コスト、運転&維持コストと変動対応

(エネ・環境・経済情勢、設計、自前技術の有無、設置場所等に依存)

	経済性
<u>世界のエネ・環境・社会・経済情勢</u>	◎
・エネ需要激増 ⇒ 多様な熱利用、小型モジュール化等で対応可	○
・地球環境悪化(CO2放出増、水・大気汚染、..) ⇒ 特段のCO2放出抑制策(炭素捕獲&貯留(CCS)システム開発や炭素税(環境税)賦課)は不要	○
・原子炉過酷事故対策(TMI 、 チェルノビル事故 以降に対策設計済み。 福島原発事故 以降、更に炉心への空気・水侵入対策を提案、設計推進中)	○ ~△
・社会経済状況変化(国際テロ、リーマンショック、シェールガス革命..) ⇒ 資材費・人件費・建設費高騰、国家財政緊縮化、国家エネ政策持続性・安定性(⇒それらの変動影響を受けないような戦略的対応が必要)	× ~△~ ○
<u>設計、自前技術の有無、設置場所..</u>	○
・資本費低減(設備簡素化、モジュール化設計、工期短縮、初期投資低減化)	○
・運転&維持(O&M)費低減(燃料費小、マルチ・モジュール構成でプラント稼働率大幅向上、環境税(炭素税)負担無し)	○
・自前技術や機器・プラント輸入有無、設置国の物価レベル等で単価が変動	—

プラント建設コスト(\$/kWt)

HTGR NOAK Plant Capital Cost as a Function of Module and Plant Ratings

原子炉出口温度: 750°C

750 C Reactor Outlet Temperature

AREVA HTGR NOAKプラント

(8-200MWtモジュール)

AREVA - HTGR Module NOAK Plant
(8-200 MWt Modules)

モジュール出力

Module Ratings

200 MWt

350 MWt

600 MWt

GA - SC-MHR NOAK Plant
(4 - 350 MWt Modules)

GA-SC-MHR NOAKプラント

(4-350MWtモジュール)

プラント建設コストはモジュール出力や
プラント出力(モジュール数)に依存

Plant Rating, MWt

プラント出力(MWt)

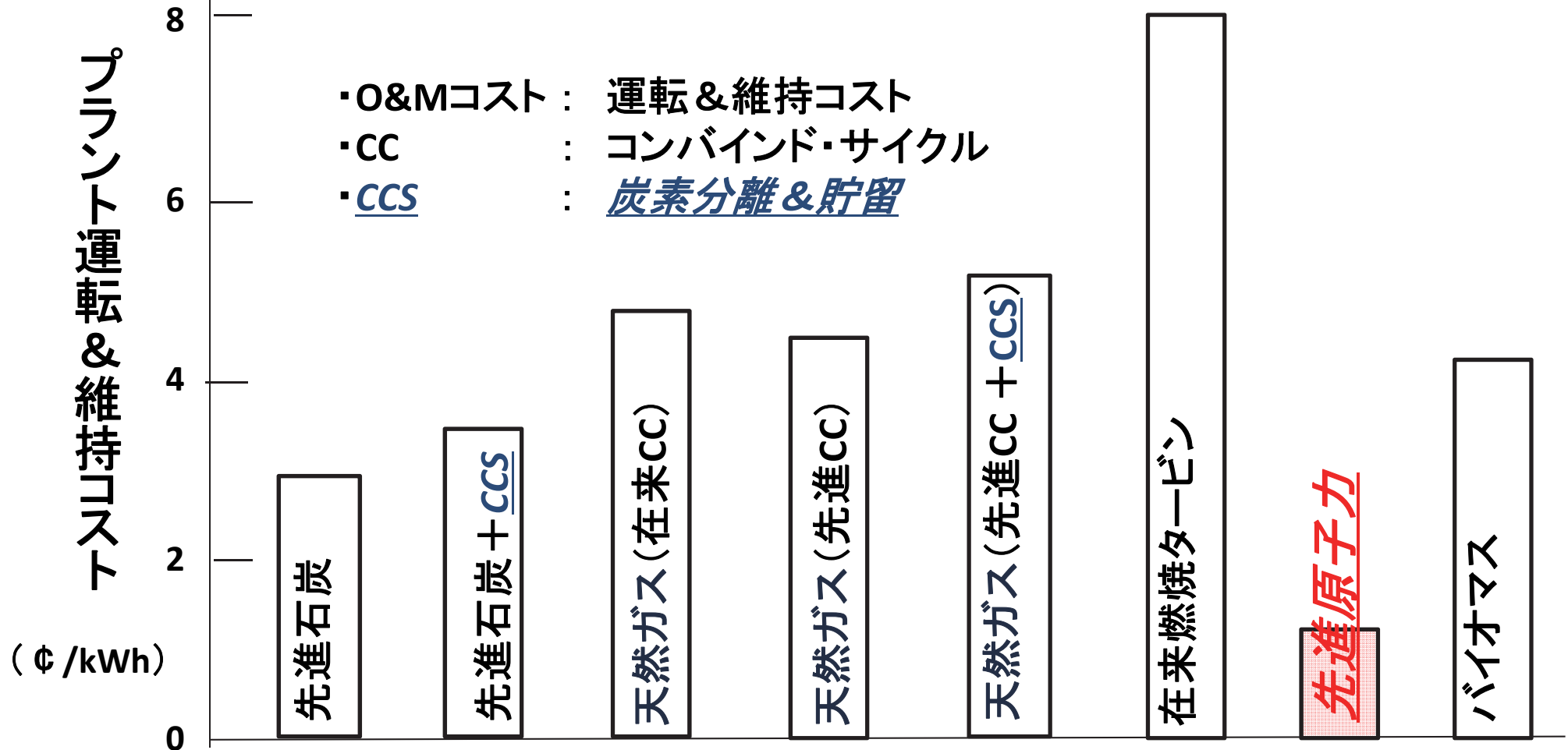
高温ガス炉プラント建設コスト(モジュール効果)

(出典)"HTGR - No More Than Ever !", F. Southworth (AREVA-USA)
on behalf of NGNP Industrial Alliance, 2011.4.12 <説明加筆>

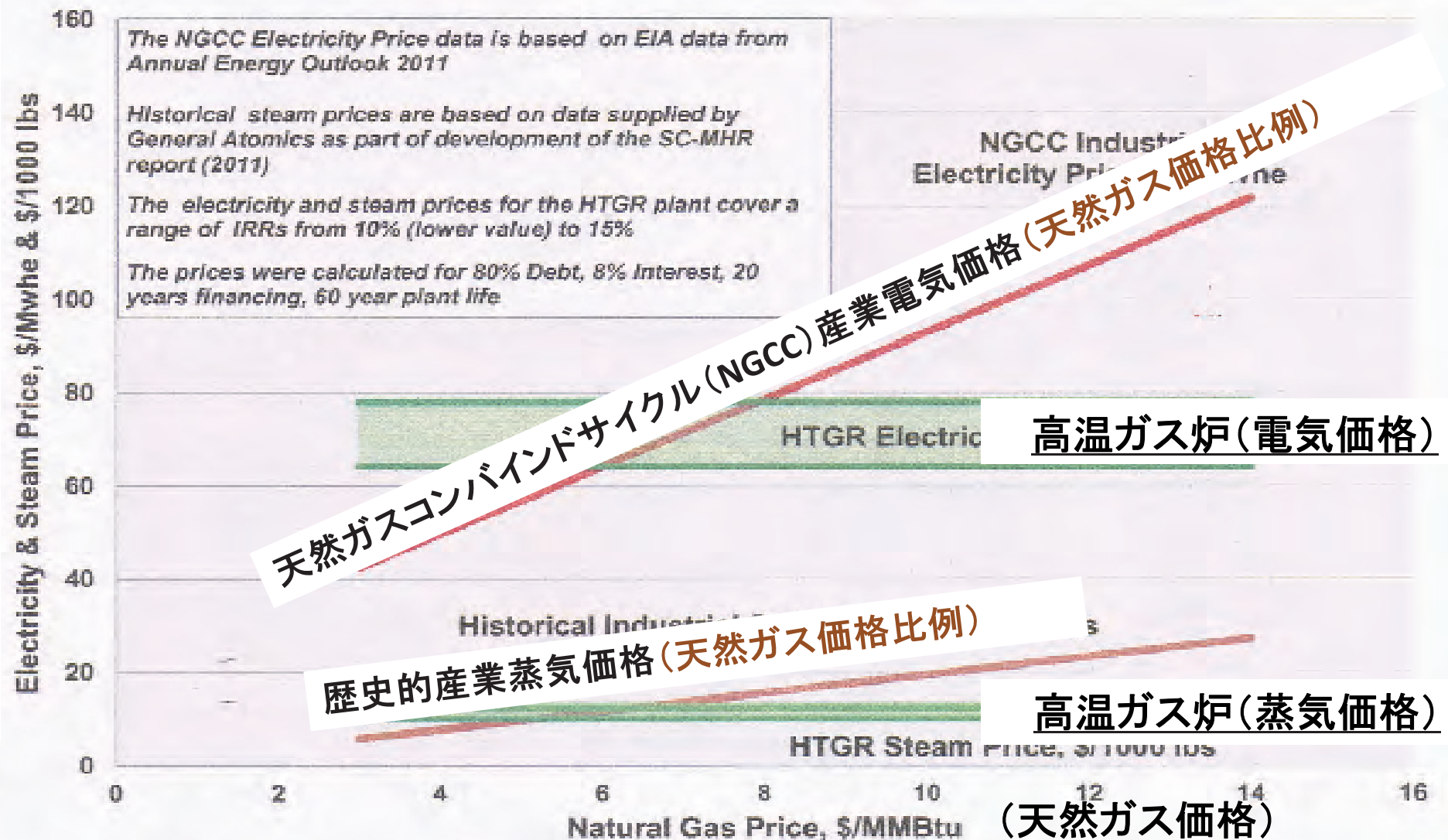
各種電源プラントの運転&維持コスト

(燃料費含む)(米国平均)(EIA-DOE, Annual Energy Outlook 2013を参考に作成)

- ・石炭火力、天然ガス火力ではCCS費を上乗せした評価も必要
- ・先進原子力の運転&維持費は石炭、天然ガス、バイオマス等より安価



電気 & 蒸気価格 (\$/Mwhe & \$/1000 lbs)



高温ガス炉(電気、蒸気)価格(天然ガス価格との競争)

(出典) NGNP Project Evaluation of Siting a HTGR Co-gen. Plant
on an Operating Commercial Nuc. Power Plant Site,

INL/EXT-11-23282, Oct.1 (updated Dec.29), 2011 <説明加筆>

6. 経済性まとめ

- 「小型モジュール式高温ガス炉」の特質は、高温性、幅広い熱利用性、極めて高い安全性、化石燃料等との協働性、環境性、膨大な潜在需要性
- その経済性は；
 - 固有安全性確実化設計により、炉出力で「経済デメリット」を被るものの、一方、設計の単純化、標準化、モジュール化、許認可容易化、需要地への近接設置、運転&維持の簡素化、柔軟な設置計画が可能になる等、上記デメリットを大きく上回る「経済メリット」を享受できる
 - その結果、「建設コスト」は軽水炉(大型炉、小型炉)より安価・・。天然ガスとは競争関係。「運転&維持コスト」も天然ガスとの競争に・・
 - 途上国(ロシア、中国、南ア・・)での製造、設置は機材費、人件費の違いから、先進国でのそれより安価の可能性あり
 - これらのコストは一般に、エネ需要動向、環境、社会、経済状況変化等に大きく影響を受けるが、当該炉システムは、基本的にそれらを織込み済みで、比較的「安定」・・と期待。その「メリット」、「期待」を「実現」するには、実規模によるプラント建設・運転・経済性などの「総合実証」が必要。現在、先進国、需要国、資源国が、エネ・環境・産業経済等の国家戦略的視点から、当該炉の開発、プラント実証、実用化を推進中
 - エネ&環境案件の経済性は国家&国際的価値判断で決まる <以上>

<付録> 各国の高温ガス炉開発背景&視点(1/2)

(エネ・環境・産業経済等の視点から、開発、実証、実用化展開中)

国、プログラム	開発背景、目的、戦略視点
<米国> NGNP(<u>実証炉</u>)	・エネ政策法(EPA-2005)、発電、水素製造、プロセス熱利用(天然資源(石炭、オイルサンド)回収・改質)、環境対策、小型モジュール炉(SMR)開発計画、製造業の活性化(雇用・輸出振興)、戦略基地需要
<カナダ> SPB	・遠隔地(鉱山、寒冷地)、戦略基地需要 ・天然資源(オイルサンド・・)回収・改質
<ロシア> GT-MHR、MHR-T	・核不拡散(核兵器解体余剰Puの焼却処理) ・発電、水素製造、プロセス熱利用
<欧州(EU)> NC21、EUROPAIRES	・欧州共同のエネ・環境戦略 ・水素製造&熱電併給
<フランス> ANTARES、SC-HTGR (米国NGNP向け)	・欧州・世界のリーダーシップ ・技術力、米国への戦略的協力、国際高温ガス炉実証炉・実用化推進
<南ア> TH-100	・PBMR(開発・実証炉計画⇒その後、中止・・)実績経験の活用 ・天然資源(U、レアアース、Th(レアアース採掘の副産物)、石炭・・)の戦略的有効活用、水素製造、石炭液化・・

各国の高温ガス炉開発背景&視点(2/2)

国、プログラム	開発背景、目的、戦略視点
<カザフスタン> KHTR(<u>実験炉&実証炉</u>)	・エネ資源(石炭、鉄鉱石、U、レアアース...)輸出 ・海外高度技術の導入&国内定着、産業振興 ・日本が設計、教育等で全面協力
<中国> HTR-10(<u>試験炉</u>)、 HTR-PM(<u>実証炉&実用炉</u>)	・エネ需要旺盛、天然資源有効利用(石炭ガス化&液化、Th...) ・環境改善(熱利用、水素製造...)、輸出振興、地方都市の開発・経済振興
<韓国> NH2&NHDD(<u>開発&実証炉</u>)	・水素エネ開発 ・輸出振興(発電、海水淡水化向け)
<日本> HTTR(<u>試験研究炉</u>)、 GTHHR300、 HTR50S、NH50/100、 NSHTR(本質的安全炉)、CBHTR (クリーンバーン炉)、...	・高温ガス炉技術の継続的開発実績。世界最先端技術を保有(炉設計、被覆粒子燃料製造、高品質黒鉛材料製造、ヘリウム・ガスタービン設計、原子炉圧力容器鍛造、水素製造、プラント設計、建設、運転、...)。技術立国 ・世界最高水準安全炉の提案&開発(本質的安全炉など超安全炉、超高燃焼度炉、多目的利用炉、...) ・福島原発事故以降の原子力の信頼性回復、輸出振興 ・海外への技術協力支援とエネ資源確保&輸入