

今後の新型炉サイクル開発への提言 (私たちの経験を踏まえて)

(3) 高温ガス炉開発への提言

2019年9月12日

伊与久 達夫
(国研) 日本原子力研究開発機構

目次

1. はじめに
2. H T T Rの概要
 - 2-1 構造
 - 2-2 歴史
 - 2-3 工夫
3. H T T Rの経験
 - 3-1 設計段階
 - 3-2 試験段階
 - 3-3 供用段階
4. 高温ガス炉開発への提言
5. おわりに

1. はじめに

- ◆ 高温工学試験研究炉 (HTTR) の建設は、1987年 (昭和62年) 原子力委員会
が示した「原子力開発利用長期計画」で認められた

- ◆ 現在、高温ガス炉開発は、平成30年7月に閣議決定された第5次エネルギー基
本計画で謳われている“・・・固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の
高度化に貢献する技術開発を海外市場の動向を見据えつつ**国際協力の下で推進す
る**”に沿って実施している

- ◆ 海外の高温ガス炉開発の動向や日本との国際協力の具体的内容、及び今後の研究
開発課題は2019年春の年会での新型炉部会セッションで報告
参考文献) 浅野; 1J_PL03 (国際協力), 大橋; 1J_PL04 (研究開発課題)

- ◆ 講演者は、
 - ・ 1979年から現在まで、一貫して高温ガス炉開発に従事し、
HTTRの設計から供用運転まで経験
 - ・ HTTRの経験を踏まえて今後の開発に向けた**具体的な提言**

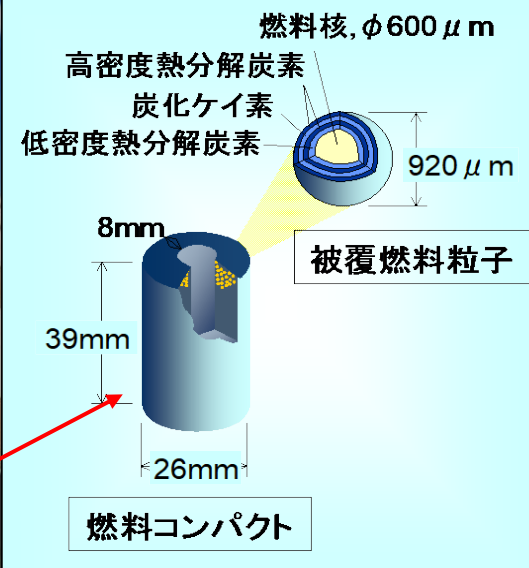
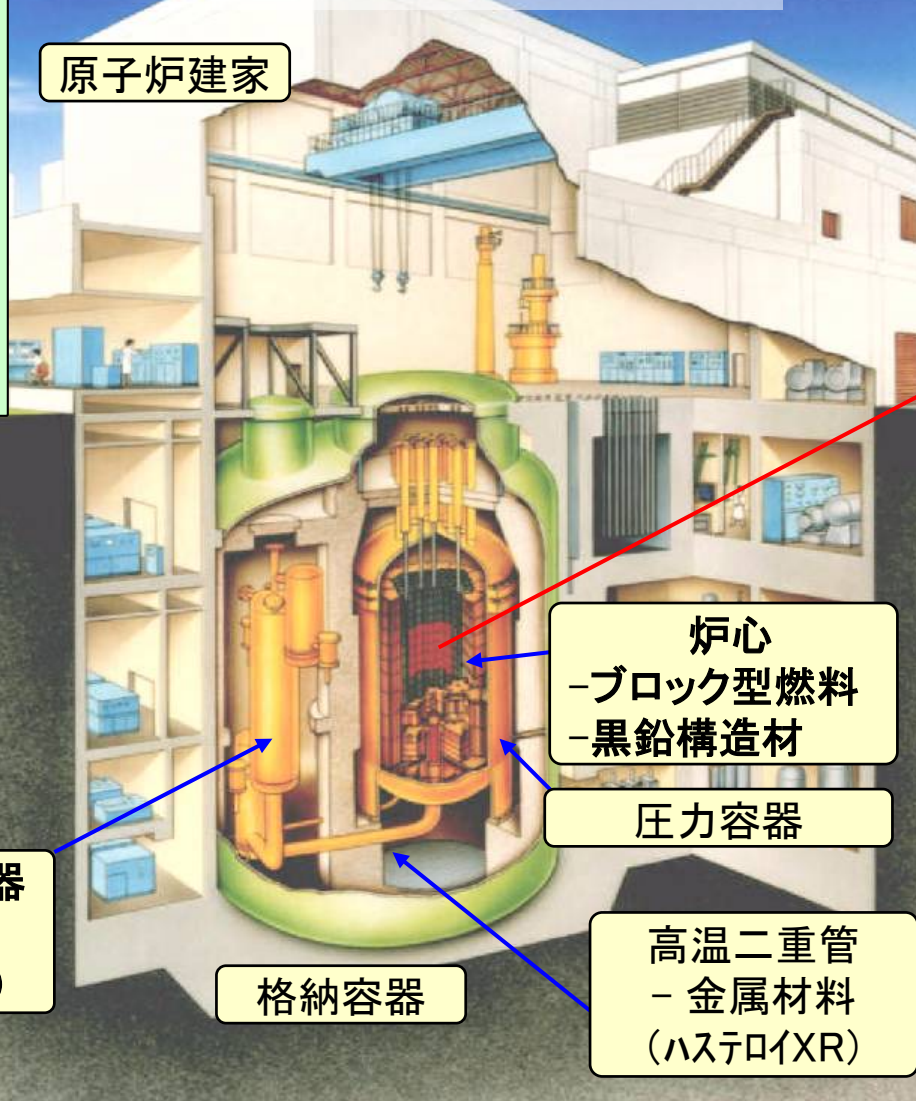
2. HTTRの概要 2-1 構造

高温ガス炉の特徴

- 1000°C近い高温ガス
 - 高い効率で、水からの水素製造・発電が可能
 - 更に、排熱利用により、熱出力の約70%を利用可能
- 安全上の特徴
 - 燃料が破損するような大規模な事故が起こり得ない設計が可能

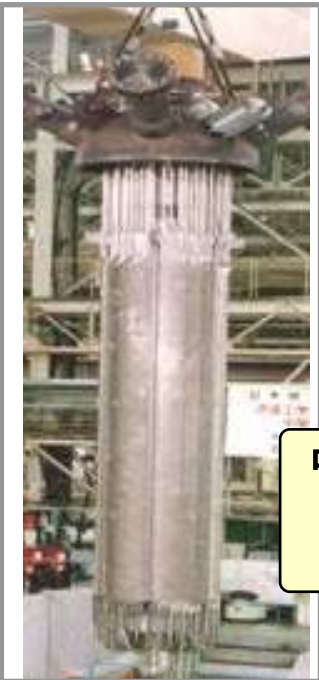
HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor)

我が国初の高温ガス炉



HTTRの仕様

熱出力	30 MW
燃料	被覆粒子・ブロック型
炉心構造材	黒鉛
冷却材	ヘリウムガス
入口温度	395 °C
最高出口温度	950 °C
圧力	4MPa (40 気圧)



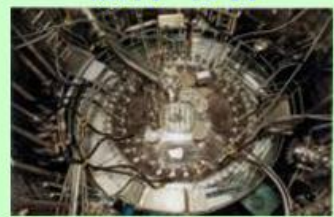
2-2 歴史 (1/5)



運転再開後	炉心流量喪失@30MWt、炉心冷却喪失試験等を計画
2011年12月21日	炉心流量喪失試験実施@9MWt
2010年3月13日	高温連続運転(50日間950℃)完遂
2004年4月19日	950℃・30MWt達成
2002年4月～	安全性実証試験開始
2002年3月6日	使用前検査合格証取得
2001年12月7日	850℃・30MWt達成
1998年11月10日	初臨界
1991年3月	着工

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)

2-2 歴史 (2/5)



1991年 HTTR建設開始



1992年4月 コンクリート打設状況



1992年10月 原子炉格納容器(CV)据付



1993年7月 CV内部のコンクリート打設



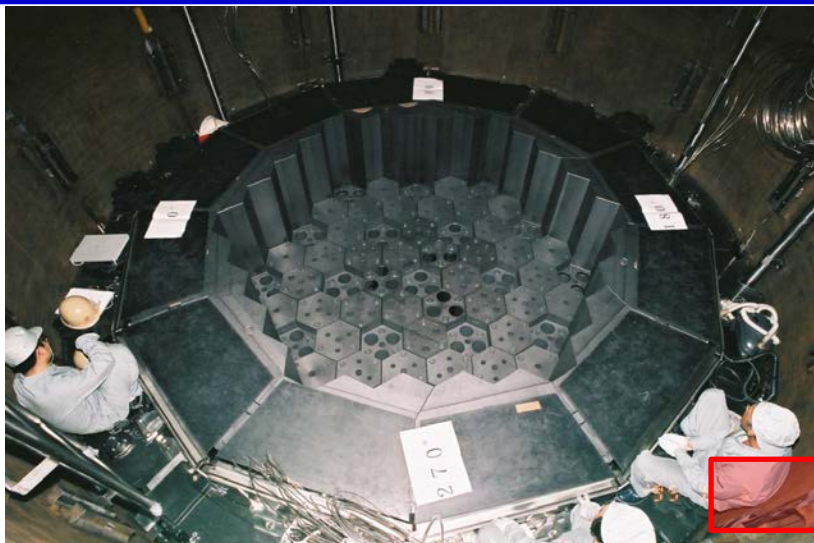
大洗港での揚陸

揚陸後の輸送

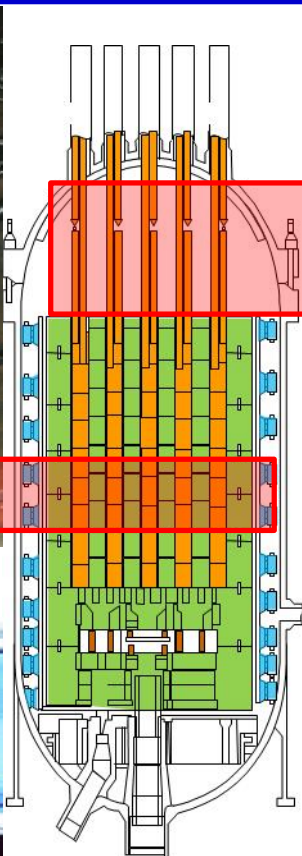


1994年8月 原子炉压力容器据付

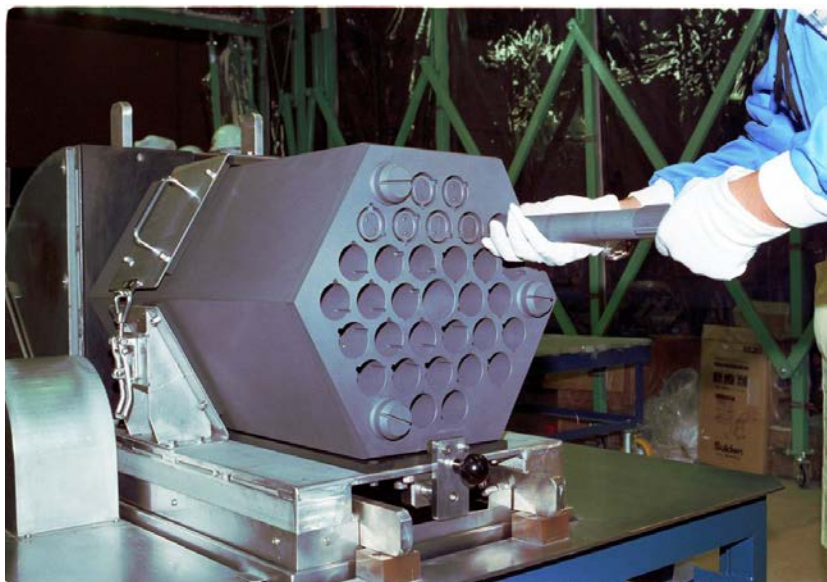
2-2 歴史 (4/5)



1995年8月 炉内構造物の据付



1996年1月 制御棒の据付



1997年9月 燃料体の組立



1998年11月10日 初臨界

2-3 工夫 (1) 設計段階

世界で初めて950°Cの高温ガスを炉外に取出すための主な工夫

- 耐熱性に優れた材料(燃料も含む)の開発
- 炉工学・熱流動・計測制御等の幅広い分野での研究開発

耐熱性に優れた材料開発とそれに起因した課題への対応策

H T T Rの材料	材料に起因した課題	主要な対応策
燃料：被覆粒子燃料 (SiC等で被覆)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製造時の破損が不可避 ・ 受入検査基準？ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料破損を許容、設計での燃料温度低減策 ・ 受入検査基準を策定(品質管理を強化)
冷却材： ヘリウムガス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 軽く、漏れやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 漏洩防止策(シール溶接、ラフチャージャー等) ・ 検知法(Heliumデテクター、AE/光ファイバー等)
減速材：黒鉛 断熱材：炭素、 カウール	<ul style="list-style-type: none"> ・ 強度評価基準？ ・ 受入検査の基準？ ・ 不純物ガスを系内に放出 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 黒鉛構造設計方針を策定 ・ 受入検査基準を策定(品質管理を強化) ・ 据付時の清浄度管理。不純物除去運転等
鋼材(圧力バウンダリ) ①2・1/4Cr・1Mo鋼NT材 ②ハステロイ-XR ③オーステナイト系ステンレス鋼	<ul style="list-style-type: none"> ・ 使用温度の制限 ・ 高温域の強度評価基準？ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部材毎に使用温度を制限(事故時の制限： ①550°C、②1000°C、③650°C) ・ 高温構造設計方針を策定、運転時は熱負荷を考慮した起動/停止操作等
制御棒(制御材B ₄ C/C) 被覆管：アロイ800H	<ul style="list-style-type: none"> ・ 被覆管の使用温度制限 (炉内照射下：900°C以下) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ スクラム時制御棒の2段階挿入 (スクラム直後、低温領域のみに挿入)

2-3 工夫 (2) 建設段階

HTTRにより、高温ガス炉技術基盤の確立と技術の高度化を図るための工夫

- 施設の立上げを職員自らが実施(計画書・手順書の作成から試験の実施・評価)
 - トラブルは研究者と技術者が一体となって解決(トラブルは最適な教材)
-
- HTTRの契約は、ターンキー方式でなく、設備・機器等の据付後に引取り、燃料装荷前の系統別/総合機能試験、燃料を装荷しながらの臨界試験及び出力上昇試験は、研究開発の一環として、試験計画書・手順書の作成から試験の実施及び評価まで、HTTRプロジェクトに参画したメーカ(関連メーカ)の協力を得て、職員自らが行った
 - 試験は、高温ガス炉の特殊性を考慮して、①ヘリウム漏れ、②熱漏れ(バイパス流れ等)、③放射線漏れの現象に細心の注意を払い、これらに起因したトラブル(不具合事象)を早期に検知できる計画とした
 - 試験は、一歩ずつ確認しながら実施(低出力から高出力、小さな外乱から大きな外乱、問題をクリアーにしてから次ステップに進む)
 - 検知したトラブルは、研究者と技術者が一体となって原因を究明し対策を講じ(関連メーカの協力も得て)、その有効性を実証(トラブルは最適な教材)

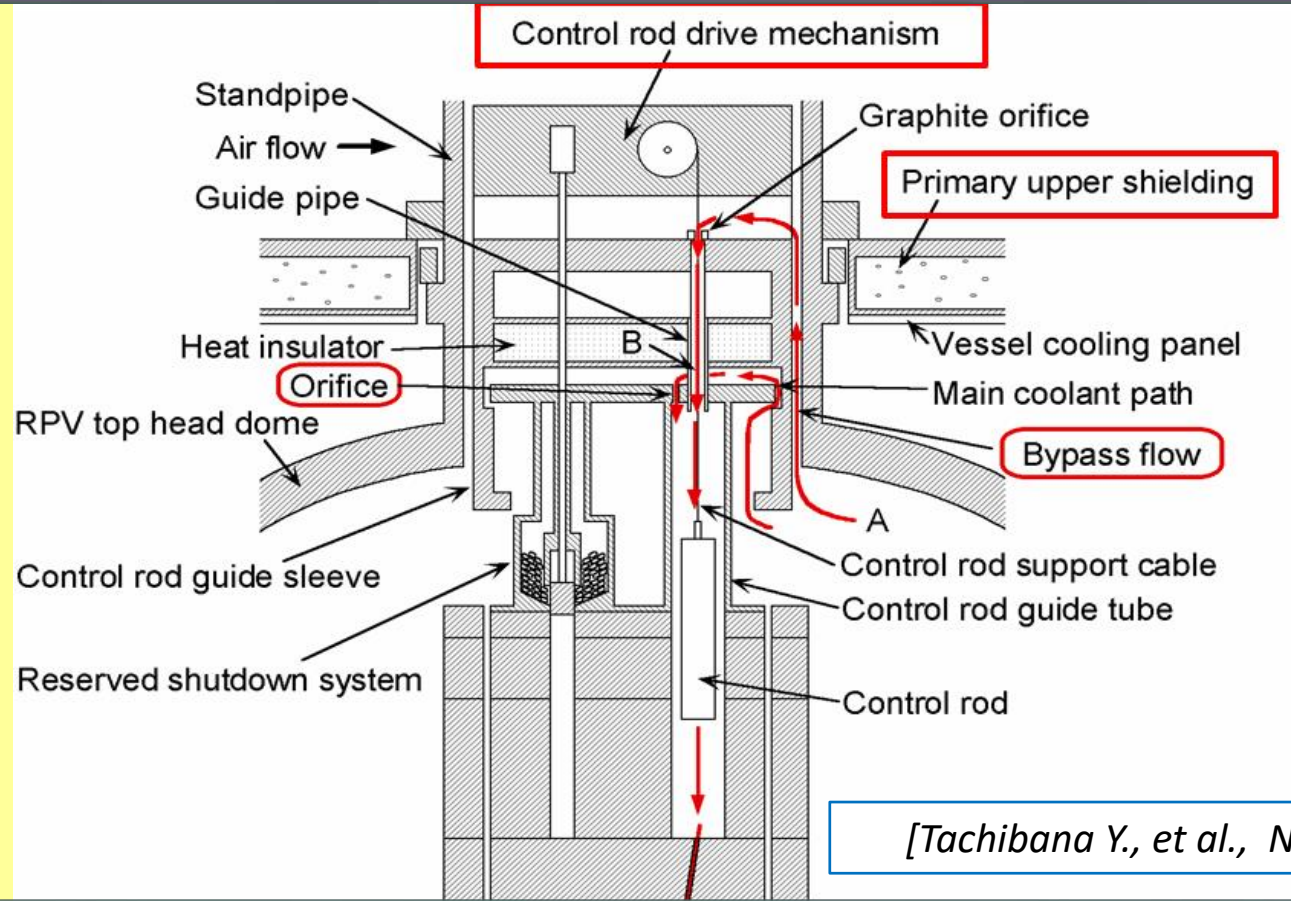
項 目	課 題	対 応 策
(A) 設計段階 設計データの取得	設計データの一部は、研究開発を行う部署(研究者)が取得。研究者は先端的な研究に興味を示し、往々にして設計データ取得に問題が生じる可能性あり(期日までに必要量のデータを取得しない等)	設計室員を、担当する設備・機器等に係るデータを取得する研究室に割り当て、相互コミュニケーションを密にして設計データ取得を管理
(B) 設計段階 規格・基準類の策定	H T T Rは我が国初の高温ガス炉で、安全基準の他、黒鉛構造物、高温機器等に適用する規格・基準類等が無い	設計部署と高温ガス炉研究開発部署が共同して規格・基準の案を作成。その後、外部専門家(大学、関連メーカー等の有識者)の検討等を経て策定 規制側も独自に策定

経験から得られた知見

(A) 研究者の研究意欲を維持させながら効率的に設計データを取得するには、常日頃からのコミュニケーションが重要。プロジェクト研究での実利的な研究(実炉設計に役立つ研究)

(B) 新たな規格・基準類の策定において、規制側の意向を汲むと往々にして長期化し、技術的に保守的になる傾向(国際会議で保守的すぎるとの意見もあった)

調整不足、初期故障、誤操作等でトラブルが多発(殆どがマイナーな事象)
最大なトラブル: 1次上部遮蔽体コンクリートの想定外の温度上昇

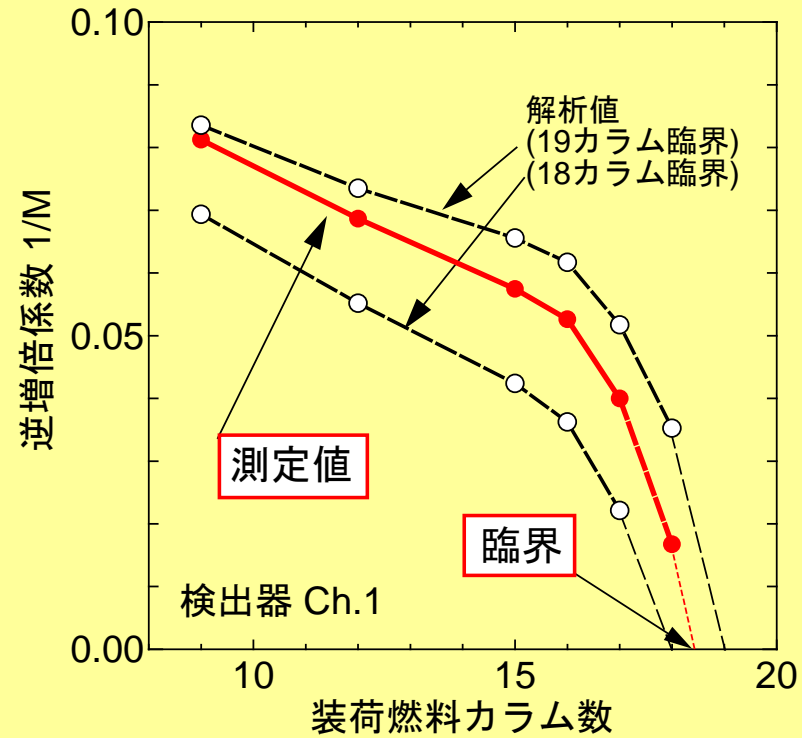
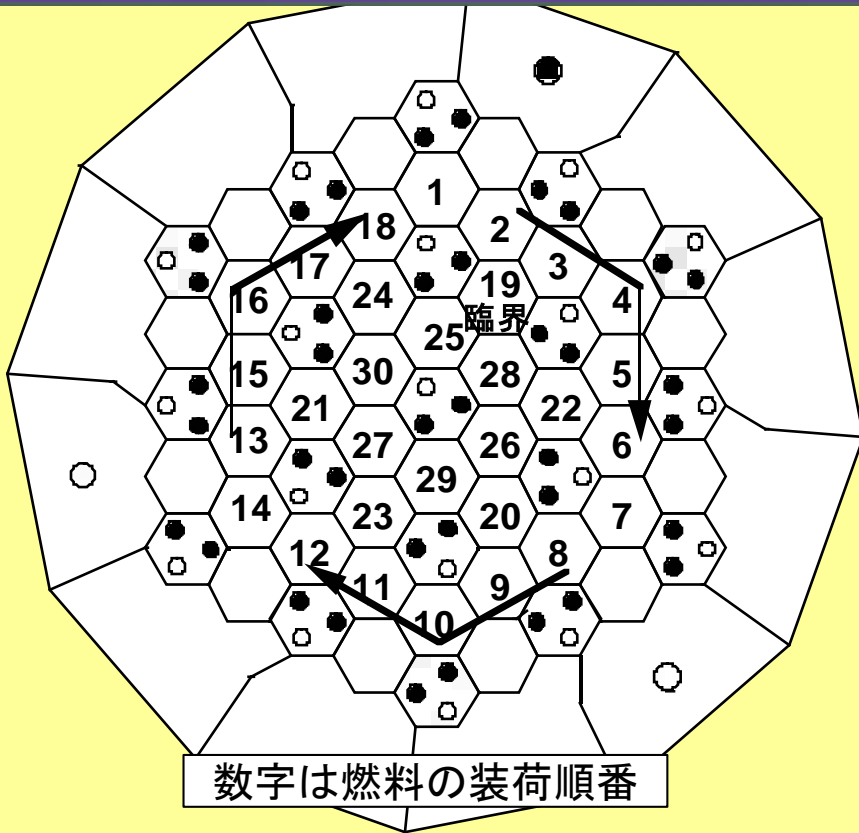


[Tachibana Y., et al., NED, 201(2000)227-238.]

経験から得られた知見: 多くのトラブルを技術者・研究者が一体となって解決したことが高温ガス炉の技術基盤確立に資した。特定の個人に作業が集中(如何に軽減するかが鍵)

3-2 (D) 臨界試験

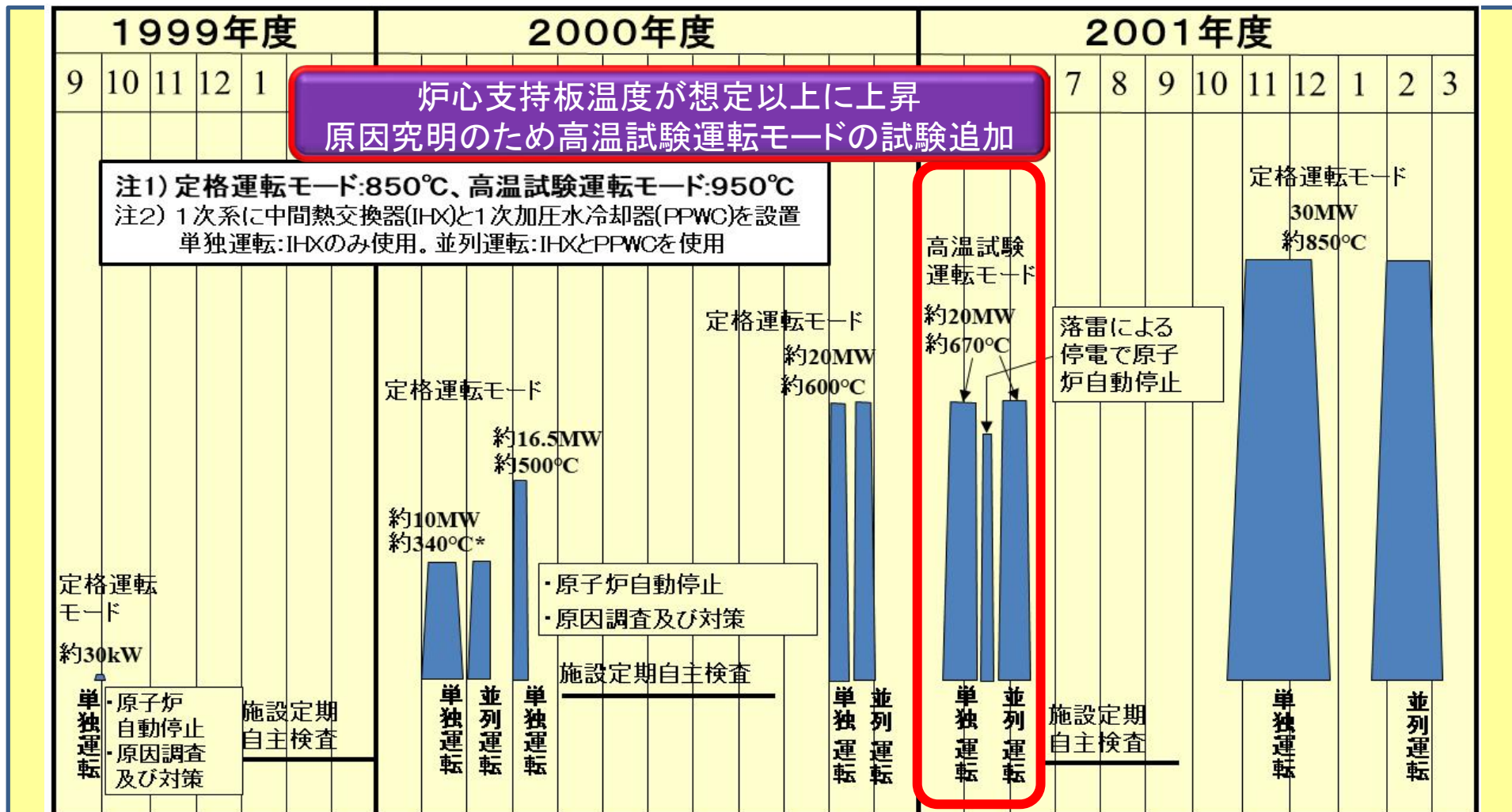
主なトラブル: 燃料交換機のトラブルと、臨界カラム数予測のズレ
 最初の臨界カラム数: 16±1カラム。再計算の結果19カラム(測定値に一致)



[藤本他、原子力誌、Vol.42,N0.5(2000).]

経験から得られた知見: 燃料交換機の機能は実機設備でフルに確認すべきであった。将来炉で採用されている環状炉心のデータは取得できたが、ダミー燃料に含まれる不純物等を軽視していたため予測がズレた。また、特定の個人に作業が集中(如何に軽減するかが鍵)

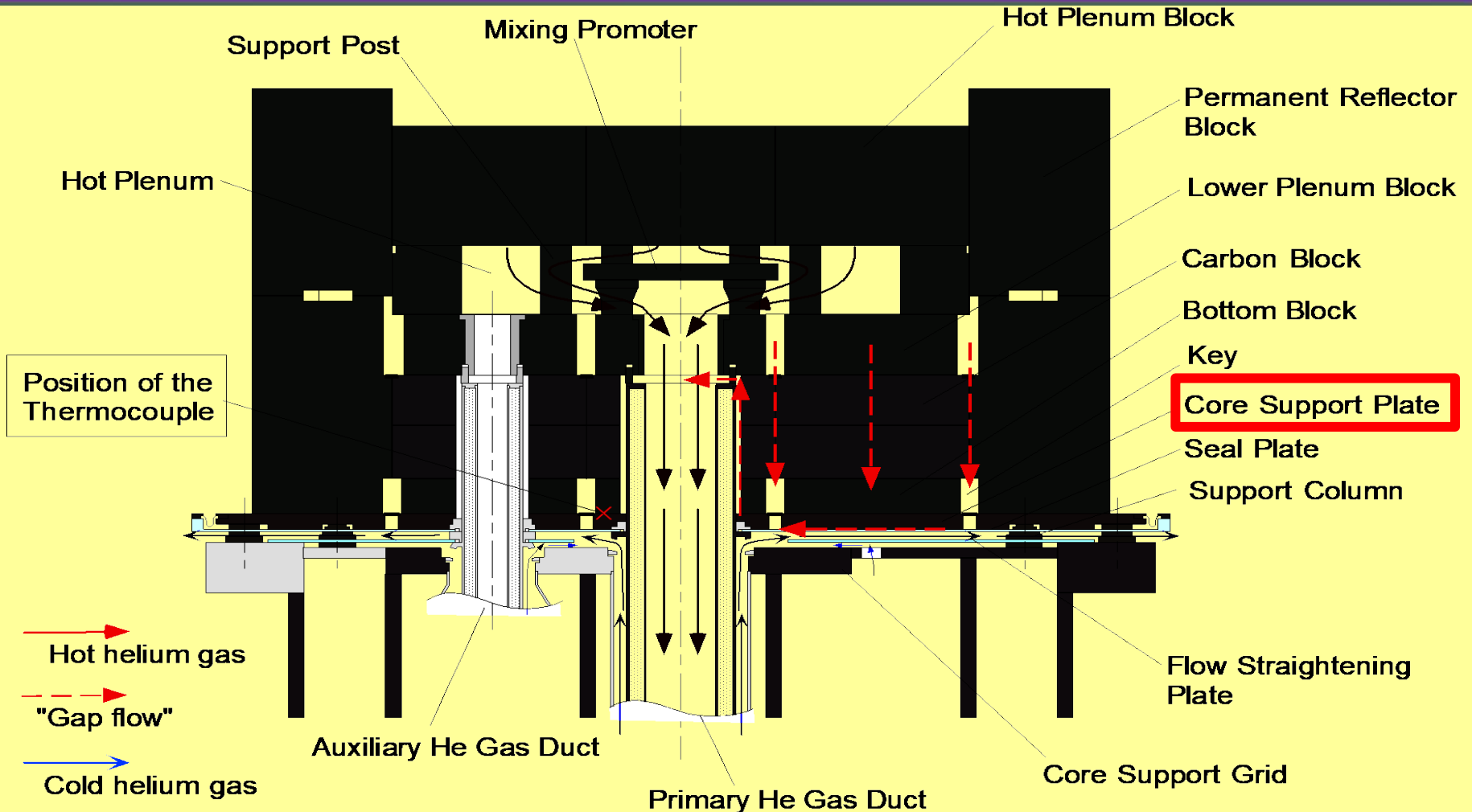
3-2 (E)出力上昇試験 (1/2)



経験から得られた知見: 一步一步確認しながら試験を実施すること、及び試験計画に柔軟性を持たせることの重要性を認識。運転班とは別に、研究開発を担当する課員で構成する試験班を設け、その場で試験結果を取得・評価することでトラブルを早期に検知できた

3-2 (E) 出力上昇試験 (2/2)

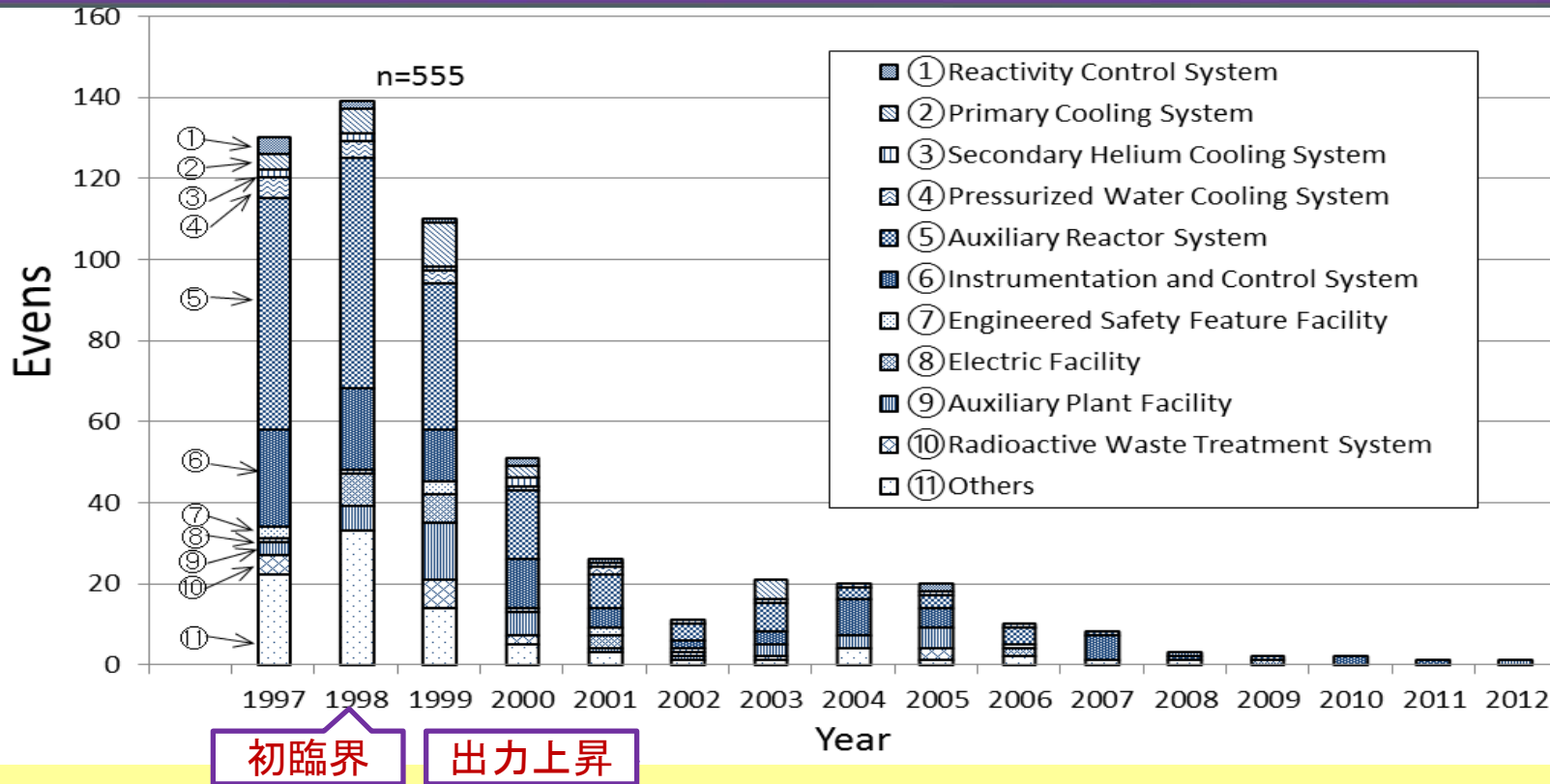
最大なトラブル: 炉心支持板の想定以上の温度上昇
 【新たに計画した中間出力の高温試験運転モードの試験により現象を説明】



[Fujimoto N., et al., NED, 233(2004)273-281.]

3-3 供用段階 (F) 運転・保守

運転員が保守作業も担当。運転手引も自らが作成し、各種試験を通して改善・改良経験したトラブルをデータベース化(下表は1997年から2012年までの推移)



[Shimizu A., et al., J. Nuclear Science and Technology, Vol.51, Nos.11-12(2014)1445-1451.]

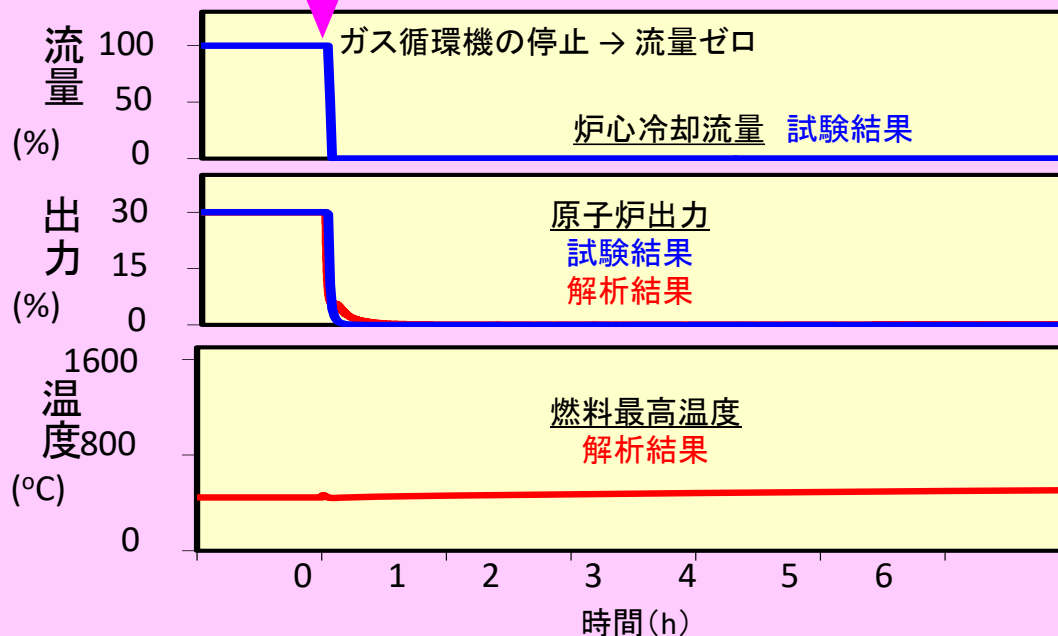
経験から得られた知見: 運転員が保守作業も担当することで、設備・機器等の操作・監視をより理解して実施できるとともに、マイプラント意識が醸成され易い。トラブル対応では、規制側と推進側への説明を経験(両者の考え方(ロジック)の習得の必要性)

3-3 (G) 安全性実証試験

OECD/NEAのTAREF* 会合(世界の研究施設を調査し、有効に活用するよう提案)

これを受け、安全性実証試験を国際共同研究(OECD/NEAプロジェクト)とする

*) TAREF : Task Group on Advanced Reactor Experimental Facilities(高温ガス炉、高速炉)



安全性実証試験

OECD/NEAプロジェクト



米国



フランス



ドイツ



韓国



チェコ



ハンガリー

制御棒挿入なし、冷却流量ゼロにおいて、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

[Takamatsu K., et al., J. Nucl. Sci. Technol, Vol.51, Nos.11-12(2014)]

経験から得られた知見: TAREF会合でHTTRを利用した国際共同研究を提案。その後、原子炉施設安全委員会(CSNI)で安全性実証試験がプロジェクト化。海外の研究者はHTTRが研究施設として優れ、日本の技術力(関連メーカーの技術力)を高く評価

4. 高温ガス炉開発への提言

提 言 内 容		補足(経験から得られた知見等)
提言1	今後の高温ガス炉開発においてHTTRを中核施設と位置付け、それを積極的に活用	(G)のTAREF会合の経験や、海外研究者との交流等から、世界的にHTTR(関連メーカの技術力)を高く評価し、その活用等を望んでいる。海外展開する際に、関連メーカの技術力をHTTRで証明
提言2	プロジェクトに従事する技術者・研究者が、自発的にマイプラント意識を持てるよう指導	(A)~(G)に亘って、プロジェクトを推進するのは“人”と再認識。人材育成が重要
提言3	研究者の研究意欲を損なわないようにして、施設の保守・運転・試験を経験させる	(C)~(E)から、研究成果の実炉での活用を理解することの重要性(プロジェクト研究の意義)
提言4	規格・基準類等は学会や国際機関を有効に活用し、過度な保守性を排除(安全性と経済性の両立)、及び最新の知見・実績を短期間でスムーズに反映できるように	(B)の規格・基準類の策定は技術的妥当性や信頼性の確保を第一に。設計から廃炉までの ルール作りが最も重要 【新規基準では、従前に比べ要求項目の増加等、厳しさ・繁雑さが増す】
提言5	施設の立上げに際しては、労務管理を確実にを行い、施設の特異性を考慮した運転・試験計画を立案し、一步一步慎重に進める	(C)~(E)から、トラブル時は特定の個人に作業が集中。また、炉の特異性(①He漏れ、②熱漏れ、③放射線漏れ)を考慮
提言6	施設の維持管理担当者には、規制組織や推進組織での業務を経験させ、幅広い視野を持たせる	(F)の施設の維持管理では、規制側及び推進側の考え方(ロジック)が必要
提言7	「国際協力の下で推進」するためにも、HTTRの運転・試験を海外の方が経験できるよう工夫を	提言1と同じく、海外からの評価が高い。 ただし、海外の方がHTTRの維持管理が出来ないので、教育訓練にHTTRを有効活用できるように

5. おわりに

- 高温ガス炉開発は長く、その研究成果に基づきHTTRを建設し、HTTRを活用して研究開発を推進
【⇒ 実用システムの原型提示】
- 本セッションでは、HTTRの設計から供用運転までの講演者の経験を踏まえて、主観的であるが、今後の高温ガス炉開発に向けて7つの提言を述べた
本提言は、関連メーカーの海外展開（海外の試験炉や実証炉の設計・建設に参画）も念頭
【関連メーカーの積極的な海外展開を期待。原子力を取巻く状況を考えると、先ずは、海外で日本の技術力を維持し高める】
- 今後の高温ガス炉開発が国際協力の下で推進され、日本のエネルギー安全保障に貢献することを願う