

新型炉部会セッション

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)

Proposition for the Future Development of the Advanced Fast Reactor Cycle (From Our Experience)

(3)高温ガス炉開発への提言

(3) Proposition for the high-temperature gas-cooled reactor development

*伊与久 達夫¹¹原子力機構

1. はじめに

高温工学試験研究炉(HTR: High Temperature Engineering Test Reactor)⁽¹⁾は、熱出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 950°C(最高)の被覆粒子燃料・黒鉛減速ヘリウムガス冷却型の、我が国初の高温ガス炉である。日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、HTR を中核施設として、高温ガス炉技術基盤の確立と技術の高度化、核熱利用の新たな利用分野を拓くための研究開発を推進している。

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「水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、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(原子力機構)との国際協力の具体的内容、及び今後の研究開発課題について、2019 年春の年会での新型炉部会セッション「新型炉の国際協力の現状と今後の研究開発課題(イノベーションの創出)」で報告されている^(2,3)。

筆者は 1979 年旧日本原子力研究所(旧原研)に入所以来、一貫して高温ガス炉開発に従事し、HTR の設計から供用運転まで経験した。その経験を踏まえて今後の高温ガス炉開発に向けて提言する。

2. 高温ガス炉の特長

高温ガス炉は、①冷却材には化学的に不活性なヘリウムガスを用いているため、冷却材が燃料や構造材と化学反応を起こさないこと、②燃料被覆材にセラミックスを用いているため、燃料が 1600°Cの高温に耐え、核分裂生成物の保持能力に優れていること、③出力密度が低く(軽水炉に比べ 1 桁程度低い)、炉心に多量の黒鉛等を用いているため、万一の事故に際しても炉心温度の変化が緩やかで、燃料の健全性が損なわれる温度に至らないこと等の固有の特性による安全性(高温ガス炉固有の安全性)に優れた原子炉である。また、900°Cを超える高温の熱を原子炉から取り出せることから、熱効率に優れるとともに、水素製造等の発電以外での利用など原子力の利用分野の拡大に役立つ原子炉--である。

3. HTR の概要

3-1 HTR の歴史

HTR 開発の歴史を示したのが図 1 である。高温ガス炉開発を開始したのが 1969 年(昭和 44 年)と古く、当初は原子力製鉄等を目的とした多目的高温ガス実験炉であった。その後、紆余曲折を経て 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 HTR の建設が認められた。

HTR は、多目的高温ガス実験炉の研究開発の成果等を基にして開発を進め、1991 年 3 月着工、1998 年 11 月 10 日初臨界、2001 年 12 月 7 日最大熱出力 30MW・原子炉出口冷却材温度 850°Cを達成し、850°Cの定格運転での使用前検査合格証を 2002 年 3 月 6 日に取得した。その後、高温ガス炉固有の安全性を実証する試験を開始した。また、2004 年 4 月 19 日に原子炉出口冷却材温度 950°Cを達成し、2010 年 3 月には高温連続運転(50 日間/950°C)を成功裏に完遂した。さらに、国際共同研究(OECD/NEA)プロジェクトとして初期出力 30%(9MW)の状態から炉心冷却材流量がゼロになる安全性実証試験を行い、図 1 右上に示すように高温ガス炉の優れた安全性を実炉により実証した⁽⁴⁾。

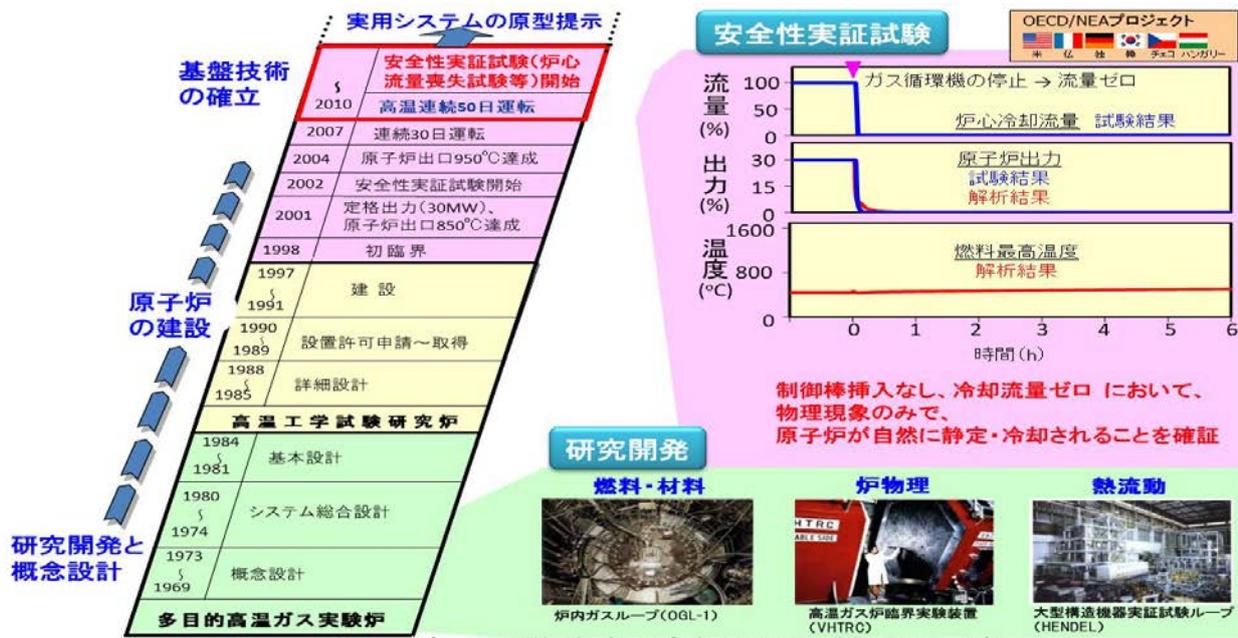


図1 高温工学試験研究炉(HTR)開発の歴史

3-2 HTRR での工夫

(1) 設計段階

HTRR は世界で初めて 950°Cの高温ガスを炉外に取出すために、耐熱性に優れた燃料・材料の開発、炉工学・熱流動・計測制御等の幅広い分野で研究開発を推進し、HTRR の建設に繋げた⁵⁾。開発した燃料・材料とそれに起因した課題への主な対応策を表1に示す。筆者は主に黒鉛材の設計に従事した。

HTRR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等のセラミックスで被覆)	製造時の破損が避けられない。受入検査基準がない。	・燃料破損を許容、炉心設計での燃料最高温度低減策 ・受入検査基準を策定し製造時の品質管理を強化
冷却材: ヘリウムガス	軽く、漏れやすい。	・漏洩防止策(シール溶接、Ωシール、ラフチャーディスク等) ・検知法(Heリークデテクター、AE/光ファイバー等)[R&D]
減速材: 黒鉛 断熱材: 炭素、カウール	強度評価・受入検査の基準がない。不純物ガスを1次系内に放出。	・黒鉛構造設計方針を策定 ・受入検査基準を策定し製造時の品質管理を強化。据付時の清浄度管理。運転初期での不純物除去運転等
鋼材(圧力バウンダリ) ①2・1/4Cr・1Mo鋼NT材 ② Hastelloy-XR ③ オーステナイト系ステンレス鋼	使用温度が制限される。高温域の強度評価基準がない。	・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	被覆管の使用温度制限。(炉内照射下: 900°C以下)	スクラム時制御棒の2段階挿入 (スクラム直後、低温領域のみに制御棒を挿入)

(2) 建設・運転段階

HTRR の設置目的及び予算的な制約から、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(KKS/SKS)、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、建設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早期に施設の不具合や異常を検知できるように計画した。具体的には、高温ガス炉は冷却材に軽くて漏れやすいヘリウムガスを用い、他炉に比べて高温領域になることから、KKS/SKS から出力上昇試験に亘って、①ヘリウム漏れ、②熱漏れ(ホットストリーク等)及び③放射線漏れの現象に細心の注意を払い、これらに起因した故障等を早期に検知できる試験計画とした。図2に出力上昇試験の実績を示す。

経験した主な不具合事象は、KKS/SKS 時の1次上部遮蔽体コンクリートの想定外の温度上昇と、出力上昇試験時の炉内構造物である炉心支持板の想定外の温度上昇で、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、その有効性を確認した。

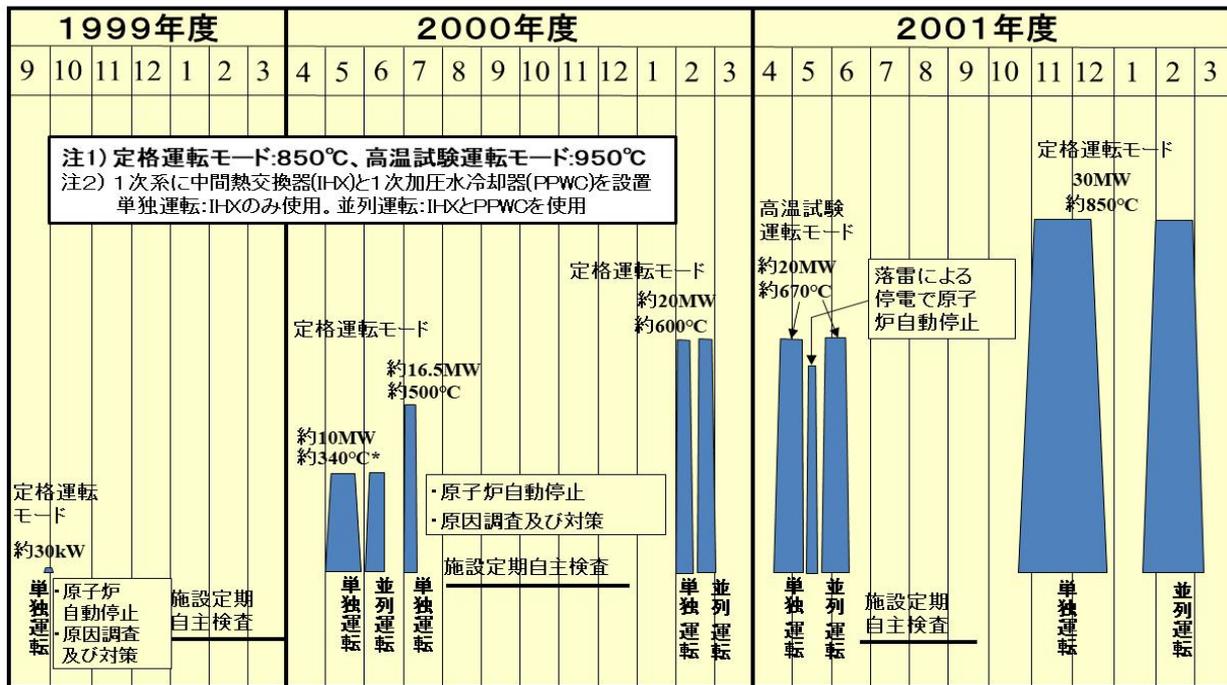


図2 HTTR出力上昇試験の実績

4. HTTR での経験

3章で述べた HTTR の設計から供用運転まででトピック的内容を、筆者の経験を踏まえて示す。

(A) 設計段階：設計データの整備

高温ガス炉の研究開発を行う部署が、HTTR の設計データを取得することとなっていたが、研究者は往々にして先端的な研究を指向するため、設計に必要なデータ取得に問題が生じる恐れがあった。このため、各々の設計担当者が、それに対応する研究室に割当てられ、設計に必要なデータが所定の時期に取得できるよう管理した(担当者ベースでの相互コミュニケーションを促進)。

(B) 設計段階：規格・基準類の策定

HTTR は我が国初の高温ガス炉であるため、安全基準の他、黒鉛、高温材料等の規格・基準類を自らが整備する必要があった。ここでは、黒鉛の構造設計方針と受入検査基準について紹介する。

黒鉛構造物は、要求される安全機能レベルの違い、交換可能性等を考慮して、炉心支持黒鉛構造物と炉心黒鉛構造物に大別して構造設計方針を策定した。本設計方針(技術基準)は、事業者側と規制側が個別に策定している。その策定までの大きな流れは；

- (1) 事業者側(旧原研)において、設計部署と研究部署が協力して設計方針案を作成
- (2) それを、メーカーの技術者、大学教授等の外部有識者(材料や構造設計等の専門家)を含めて検討
- (3) (2)の有識者からの意見等を踏まえて事業者の設計方針を策定し公開⁽⁶⁾
- (4) 規制側は、安全審査においては、(3)の設計方針の基本的考え方の妥当性を審査
- (5) 規制側は、事業者の設計方針をベースに、(2)の有識者とは別の有識者に検討させる
- (6) 規制側は、(5)の有識者からの意見等を踏まえて規制側の技術基準を策定(内規)

この流れで規格・基準類を策定すると、期間が長くなることと、技術的に保守的な傾向になる。

一方、黒鉛材料の受入検査基準の策定において、当時の黒鉛製造メーカー等の窯業界は閉鎖的な社会で、素材から製品になる工程での検査項目の選定とその判定基準の設定は困難を極めた。また、黒鉛構造物に含まれる有害な欠陥をどのように排除するかが大きな問題となった。東海1号炉(マグノックス炉)の受入検査では、全数黒鉛ブロックに強度試験を実施した⁽⁷⁾。しかしながら、受入検査で負荷すると強度が低下する可能性があることから、HTTR では非破壊的方法を選択した。黒鉛材料の非破壊検査技術は確立されていなかったため、非破壊試験の専門家や関連会社(黒鉛製造や黒鉛構造設計担当)の協力を得て、HTTR に使用する黒鉛材料を対象に、その具体的な検査方法や判定基準を定めた⁽⁸⁾。

(C) KKS/SKS

KKS/SKS は、建設メーカーの専門家をスーパーバイザーとして、職員自らが試験計画書・手順書を作成するとともに、一部職員が運転員として直勤務体制で試験を実施した。機器等の調整不足、初期故障、誤操作等で不具合事象が多発した。これらの不具合事象も技術開発の一環として分析・評価し対策を講じ、それを系統的に整理した。本試験中の最大のトラブルが 1 次上部遮蔽体コンクリートの想定外の温度上昇で、研究者と一体となって、この原因を究明し、対策を施し、燃料装荷前にその効果を確認した。

(D) 臨界試験

HTTR の炉心は燃料体 30 カラム(1 カラムに 5 つの燃料体ブロック)で構成しており、臨界試験は外周部の燃料を装荷しながら実施し、19 カラムの環状炉心で初臨界を達成した。本試験での問題点は①燃料交換機の不具合と、②臨界カラム数の予測がズレたことである。

①は、燃料交換機の性能確認を、実際の燃料貯蔵設備、原子炉本体等を使用しないで実施したことから、燃料交換機の調整等が十分でなく、装荷初日でトラブルを発生するなど調整・補修に数ヶ月要した。

②は、中心から燃料を装荷するのではなく、より計算が難しい環状炉心での初臨界を計画したことや、最初に炉心に装荷したダミー燃料体中の不純物量等を適切に考慮していなかったため、実際より少ない燃料カラム数で初臨界になると計算していた。このため、燃料装荷を一時中断し、再度、計算による初臨界量(燃料カラム数)を見直して⁽⁹⁾から燃料装荷を開始した。

(E) 出力上昇試験

HTTR は原子炉出口冷却材温度が 850°C と 950°C の 2 つの運転モードがあり、先ず 850°C の出力上昇試験で使用前検査合格証を取得し、2 年程度の運転経験を積んで 950°C を達成した。ここでは、850°C の出力上昇試験について述べる。

試験は図 2 に示すように、出力が低出力、中間出力及び高出力(定格出力)と 3 段階に分けて、数多くの試験を実施するとともに、設備・機器等の性能を確認(不具合の有無も確認)しながら定格出力を達成させた。出力上昇試験の実施体制では、運転班とは別に試験班を設けた。試験班は研究開発を担当する課員で構成し、運転班と試験内容を相互確認して試験データを取得・評価して、当日試験日報を作成し、関係者に周知した。本試験でも種々の不具合が発生し、それを解決しながら試験を進めた。大きな問題は、炉内構造物である炉心支持板の想定外の温度上昇で、この原因究明のため、図 2 に示すように、新たに中間出力の高温試験運転モードの出力上昇試験を計画した。本試験で現象を究明し、対策を施した。

(F) 運転・保守(新規制基準以前の経験)

HTTR の運転手引は、運転員自らが作成し、KKS/SKS 等での運転実績を反映させて改善・改良を図った。現在でも、1 サイクルの運転終了後には、運転班長が中心となって、運転手引を見直している。運転手引は、設備・機器の状態や運転員の技能、QA 文書の変更等が影響するので、常に見直しが必要となる。

原子炉施設の保守は、建設メーカーから設備・機器を引取ってから行っているため、二十年以上原子力機構が実施している。HTTR では運転員が各々チームに分かれ原子炉施設の保守も担当している。数々の故障・トラブルを経験し、その対策等を施し、それをまとめたの外部への発表、技術報告書の作成等、高温ガス炉技術の蓄積に努めた。また、規制対応を確実にし、安全確保を最優先に施設を維持管理した。

(G) 安全性実証試験

高温ガス炉固有の安全性を実証する試験は、反応度の投入と冷却能力の喪失を模擬した。冷却能力の喪失を模擬する試験として最も厳しい条件が、炉心流量喪失と炉心冷却系喪失である。これらの試験を、高温ガス炉の研究開発を行っている部署と一緒に、原子力機構の安全研究センターの協力を得て、国際共同研究(OECD/NEA-LOFC)プロジェクトとした。本プロジェクトで計画した 3 つある試験のうち、1 つの試験を実施した⁽⁴⁾後、東北地方太平洋沖地震が発生。残り 2 つの試験は、運転再開後に行う計画である。

5. 経験に基づく提言

これ迄の HTTR での経験を踏まえて、今後、高温ガス炉開発を牽引する人達に提言(お願)する。

【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

高温ガス炉プロジェクトを推進するに際して、その象徴となる施設が存在することで、HTTR の設計・建設に携わったメーカーの技術力を維持でき、国内のみならず海外も含めた技術者・研究者を吸引する力が強まる。国内外の高温ガス炉開発を促進することが期待される。

【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

プロジェクトを推進するのは“人”で、そのプロジェクトが原子力基本法の目的に則っていれば、それを積極的(自発的)に推進する技術者や研究者は存在する。(A)から(G)までの経験で再認識した。

【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)から(E)の経験等から、施設の維持管理や試験を経験させることで、研究成果がどのように活かされるか、また、現場で新たな研究テーマを見つけられる可能性もある。研究目的が明確になる。

【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)の経験等から、高温ガス炉で必要となる規格・基準類等は、学会等で検討することで、技術的妥当性や信頼性が確保できる。黒鉛構造設計方針について、原子力学会で特別専門委員会を 2008 年度に設立して検討したことは良い事例。また、黒鉛材は長期に亘ると一部の特性が僅かに変化すること(HTTR で経験)があり、受入検査の判定値は、購入する前に検討する必要がある。

【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、施設の特殊性を考慮した運転・試験計画を立案し、一歩一歩慎重に進める

(C)から(E)の経験等から、不具合対応時には特定の個人に作業が集中するので、作業管理や労務管理を工夫する必要がある(組合対応含む)。初期の運転・試験では、確実に故障・トラブルは発生するので、施設の特殊性を考慮して(2.2 節の(2))で示した①He 漏れ、②熱漏れ、③放射線漏れ、出来るだけ早期に異常を検知し、効率的に対策が施せる計画に。

【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、幅広い視野をもたせる

(F)の経験等から、トラブル対応等において、保安の観点から規制側へ、研究計画の変更や対策費の工面等で推進側へ説明し、了解を得る必要があり、現場でも両者の考え(ロジック)を身に付けさせる。

【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工夫を

海外の技術者が HTTR の運転員になることは保安上の要求等で厳しいが、HTTR を教育訓練に使用できるよう許可を変更することで、海外の研究者・技術者を HTTR で教育訓練できる。

6. 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、それを活用して高温ガス炉の研究開発を実施してきている。ここでは、HTTR の設計から供用運転までの筆者の経験を踏まえて、主観的ではあるが、今後の高温ガス炉開発への提言を述べた。

最後に、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。

参考文献

- (1) S. Saito, et al., JAERI 1332(1994).
- (2)(3) : 日本原子力学会 2019 年春の年会, 新型炉部会セッション, (2)浅野, 1J_PL03, (3)大橋, 1J_P04
- (4) K. Takamatsu, et al., J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 51, Nos.11-12(2014).
- (5) 齋藤他, 原子力誌, Vol.32, No.9(1990).
- (6) 大洗研究所高温工学試験研究炉設計室他, JAERI M89-006(1989).
- (7) 豊田他, JAERI-M 91-102(1991).
- (8) 大岡他, JAERI-M 93-003(1993).
- (9) 藤本他, 原子力誌, Vol.42, No.5(2000).

*Tatsuo Iyoku

Japan Atomic Energy Agency