講演　高温ガス炉プラント研究会　活動報告

「高温ガス炉に関する国内外動向調査報告」

2023年1月16日

高温ガス炉プラント研究会 テクニカルアドバイザー
伊与久達夫

本 講 演 の 目 次

１. 高温ガス炉の炉型について

２. 世界における高温ガス炉の開発状況

３. 政策的側面からの情報調査・調査結果

４. 技術的側面からの情報調査・調査結果

５. 各国の動向

5.1 日本

5.2 中国：HTR-PM

5.3 米国：ARDP計画＆燃料開発

5.4 カナダ：SMR計画

5.5 英国：AMR計画

６. おわりに

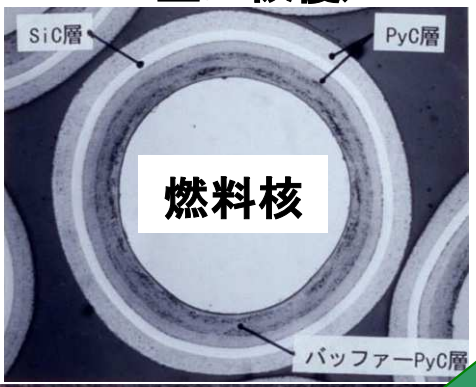
付録 （付録1～付録3）

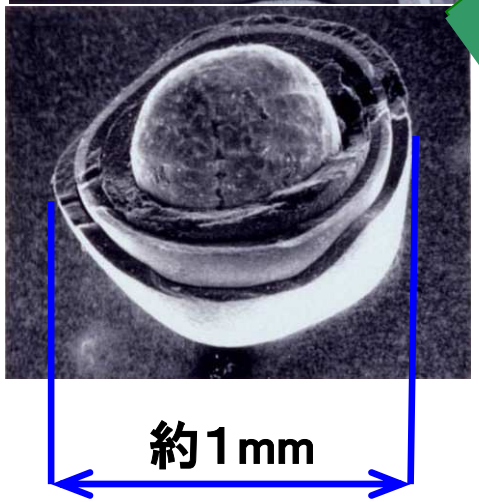
1. 高温ガス炉の炉型について

「ブロック型炉心」と「ペブルベッド型炉心」の違い

被覆燃料粒子

(燃料核をセラミックスで多重に被覆)

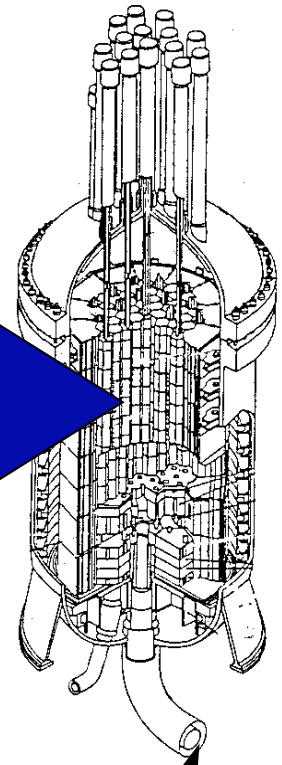




燃料コンパクト

黒鉛ブロック

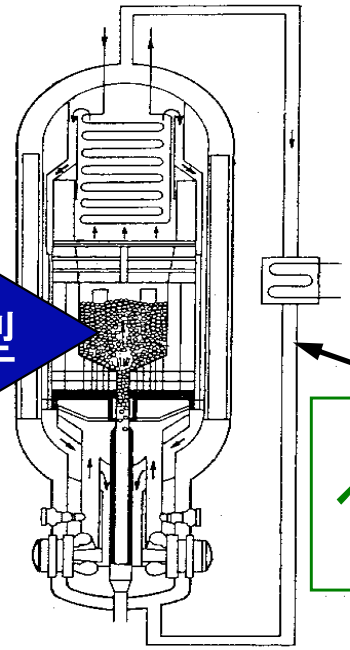
ブロック型



減速材、炉心構造物に黒鉛材料を使用

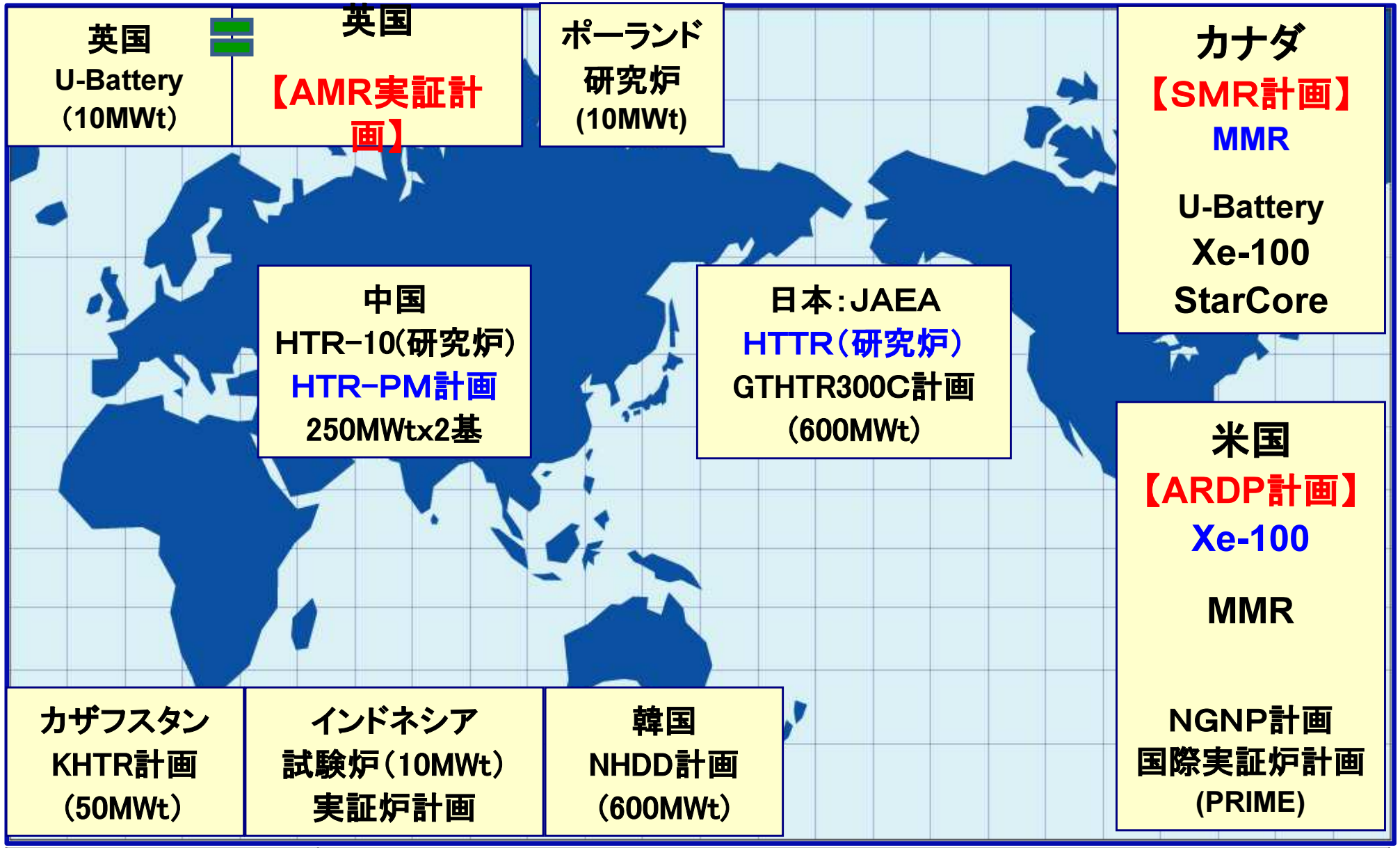
球状燃料(直径60mm)

ペブルベッド型



冷却材にヘリウムガスを使用

2. 世界における高温ガス炉の開発状況



ブロック型炉心	日本(HTTR等)、英国(U-Battery)、米国(MMR, PRIME) ・・・
ペブルベッド型炉心	中国(HTR-10、HTR-PM)、米国(Xe-100)、インドネシア(RDE)

3.　政策的側面からの情報調査・調査結果

調査方針：国内外を対象とし、政府、研究機関、民間等の公開情報を調査（2022年）

国内	➢ 1月：HTTRが炉心冷却喪失試験@30%出力(9MW)を実施【OECD/NEAプロジェクト】 ➢ 2月：JAEAが統合エネルギーシステムに係る世界初の国立研究所サミットに参加(英 COP) ➢ 3月：HTTR・安全性実証試験(全出力からの冷却材流量喪失試験)の延期を発表 ➢ 4月：JAEAと三菱が、カーボンニュートラル実現に向けたHTTR-水素製造実証事業を開始 ➢ 11月：JAEAが「高温ガス炉プロジェクト推進室」を本部組織(副理事長が統括)として設置 ➢ 11月：JAEAとNCBJの協力取決めを改定し、JAEAが試験炉の基本設計に協力
米国	➢ 2月：**アラスカの電力協会とUSNCは、MMRを商業設置する可能性を探ることに合意** ➢ 2月：DOEは、クリーンエネルギーサプライチェーンを確保するための戦略を立案 ➢ 3月：X-energyは、**Xe-100**のプロトタイプ原子炉保護システムの4セットのうち1セットを試作 ➢ 3月：カーチスライトは、高温炉に使用する金属部品の設計・製造が可能【ASMEで認可】 ➢ 5月：X-energyは、黒鉛製造会社Amsted Graphite Materialsとパートーシップを締結 ➢ 6月：米国防総省のマイクロ炉PeleプロジェクトでBWXTを選定【X-energyと競合】 ➢ 6月：米メリーランド州は、X-energyとフロストバーグ州立大学に助成金を授与し、**Xe-100**を石炭火力発電施設にリプレースすることの利点を広範囲に評価 ➢ 7月：研究所の報告書「高度な原子力技術への投資と政策支援は、国家的利益を生み出す」 ➢ 7月：X-energyは、Zachry Group等の建設会社と初号機等を全米で設計・建設すると発表 ➢ 7月：X-energyは、カナダ・サスカチュワン企業体と協力関係を築く ➢ 8月：X-energyは、メキシコ湾沿いのDow施設に**Xe-100**を建設する基本合意書を交わす ➢ 8月：DOEのARDP計画で、基本設計の6年間プロジェクトにX-energyに4,000万米ﾄﾞﾙ授与 ➢ 8月：**韓国のHyundai Engineeringは、USNCにMMR用の材料とサービスを提供** ➢ 12月：X-energyは、アレス(AAC)と最終的な企業統合契約を締結し、上場の予定 ➢ 12月：X-energyは、Xe-100のプロトタイプ原子炉保護システムの試作を完成(3月の続き)

主な出典：WNN（https://www.world-nuclear-news.org/）、JAIF（https://www.jaif.or.jp/journal/news/）

4. 技術的側面からの情報調査・調査結果 （1/3）

調査方針：国内外会議を対象とし、高温ガス炉の特徴を考慮して調査・整理(付録1参照)

会議名	国名等	炉型	分　野	特　記
ICONE29 【8月リモート】 （29件）	中国：25 日本：3 米国：1	**HTTR：2** **HTR-10：1** **HTR-PM：2** **HTR-PM600：1** **GA-MHTR：1**	分野1（燃料）：4 **分野2(黒鉛)：7** **分野3(金属)：6** 分野4(核)：2 分野5(熱流動)：5 分野6(その他)：3 分野7(熱利用)：2	・主催地が中国：中国25件、日本3件と米国1件と、殆どが中国からの発表 ・黒鉛7件、金属6件及び燃料4件と、燃材料関係が計17件と多い ・核分野は日本からの2件 ・熱流動分野で、米国の大学から1件、中国からHTR-10やHTR-PM等に関する発表
原子力学会 春の年会 【3月リモート】 （12件）	JAEA：8 大学：3 メーカ：1	―	分野1（燃料）：2 分野4(核)：1 分野6(その他)：6 分野7(熱利用)：3	・新型炉と海外情報連絡会が新型炉に関する企画セッションを開催 ・HTTR熱利用計画：JAEAがシリーズ発表 ・大学から核計算、耐酸化及びトリチウム生産に関して発表
原子力学会 秋の大会 【9月茨大】 （12件）	JAEA：4 大学：5 メーカ：3	―	分野1(燃料)：2 分野4(核)：3 分野5(熱流動)：1 分野6(その他)：3 分野7(熱利用)：3	・社会動向を踏まえた新型炉開発の価値とのテーマで、企画セッションを開催 ・高温ガス炉のテーマで、JAEAと三菱の協同研究をシリーズ発表 ・大学からHTTR炉心でのPu燃料の最適配置、濃縮度数低減、高燃焼度燃料、SFの燃焼度測定に関して発表

4. （2/3） *ICONE29*

- **参加国**：3ヶ国が参加し、その発表件数は中国が25件、日本が3件及び米国が1件で、計29件。殆どの発表が主催国である中国。発表分野では黒鉛が7件と最も多い

- **燃料分野**：燃料粒子の破損率や破損確率、破損燃料から放出される**FP**の監視技術等、4件が発表された

- **黒鉛分野**：**SiC**コーティングした**C/C**複合材のイオン照射の影響、黒鉛の引張強度の歪速度依存性や寸法効果、水侵入事故時の黒鉛ダストの振る舞い等が発表された

- **金属分野**：中間熱交換器用材料として**インコネル617**の高温クリープ特性や高温腐食挙動、**アロイ800H**のコーティングによる耐食特性や9種類の材料に対するクリープ試験結果、及び**He**循環機の動的磁気軸受での振動制御等、6件が発表された

- **核分野**：日本から高温ガス炉用の**ORIGEN2**ライブラリを作成し**MVP-BURN**コードとの解析結果で比較したものや人工知能での制御棒位置予測の2件が発表された

- **熱流動分野**：米国パデュー大学から**GA-MHTR**の減圧事故研究用の縮尺模型設計や、中国から**HTR-10**の**CFD**解析(**IAEA**のベンチマーク問題)、ペブル炉心に微小球を装荷しての熱伝達特性向上や**HTR-PM**での**RCCS**による除熱等、5件が発表された

- **熱利用分野**：日本から水素製造設備と炉の過渡解析を**RELAP5/MOD3**コードに基づいた解析コードを開発しその解析結果等、2件が発表された

4. （3/3） 原子力学会(2022年)

春の年会	➢ 新型炉部会の企画セッション(テーマは第4世代炉の国際協力と我が国の研究開発の状況): GIFにおける最新の取り組み状況と、高温ガス炉の研究開発とHTTR運転再開への取り組みをJAEAが報告 ➢ 海外情報連絡会の企画セッション: 原子力イノベーションを巡る海外の研究開発動向と、原子力イノベーションを巡るJAEAの国際戦略を報告 ➢ HTTR-熱利用試験計画: JAEAからシリーズ発表で、①計画の概要、②システム評価コードの開発計画、③水素製造施設異常時に漏えいした可燃性ガスの火災爆発影響評価手法の概要や開発計画等 ➢ 大学: 高温ガス炉用のORIGENライブラリ作成手法の検討(九大)や、高温ガス炉空気侵入事故時におけるSiC燃料コンパクトの酸化に関する研究(東大)など
秋の大会	➢ 新型炉部会の企画セッション(テーマは社会動向を踏まえた新型炉開発の価値): ①総合エネルギー調査会での革新炉WGの活動をベースに、エネルギー安全保障・廃棄物問題解決等について報告。②再生可能エネルギーと共存できる新型炉によるカーボンニュートラルへの貢献として、HTTR-水素などにも触れて報告。③海外動向として、米国、英国、カナダなどの開発動向等を紹介 ➢ JAEAと三菱重工: HTGRと水素製造施設の安全な接続技術の確立及びHTGRの高温熱を利用したカーボンフリー水素製造技術の成立性確証を目的とした新たなプロジェクトを開始。そのシリーズ発表 ➢ 三菱重工: 水素製造と発電を両立する高温ガス炉コジェネプラントについて、ここ数年、シリーズ化して発表。今回は、600MWtと200MWt炉心における核・熱特性について報告 ➢ 大学: 小型モジュール高温ガス炉の高出力密度化運転を想定して、HTTR炉心でのPu燃料の最適配置を研究した結果(東大)、高温ガス炉用被覆燃料の高燃焼度照射試験における解析結果(北大)、HTTRの使用済み燃料の燃焼度・物質量測定手法(γ線の測定)の予備検討の結果(九大)など

5. 各国の動向　　5.1 日本

経済産業省 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ*1

- **ロードマップ提示**：4回(2022年4月20日、5月19日、7月1日と7月29日)の革新炉WGで「カーボンニュートラルやエネルギー安全保障の実現に向けた革新炉開発の技術ロードマップ」を提示
  - 本中間整理案では、革新軽水炉、**高温ガス炉**などについて、2040～50年以降を見据え、**導入までの時間軸をイメージした開発工程(研究開発、設計、製作・建設、運転など)**を示す技術ロードマップを提示
  - 議論された課題への対応：**①革新炉開発に係る方向性の明瞭化、②開発予算・施設の整備、③革新炉開発を支える事業環境の整備、④開発の司令塔機能の強化、⑤サプライチェーンの維持・強化**
- **深堀り**：革新炉WGはロードマップ提示後、検討の深掘りに向けた論定整理*2や箇々の論点で議論する

- **第29回原子力小委員会**：2022年8月9日【革新炉WGでの中間整理案を説明】*3
  革新炉WG座長の黒崎健氏（京大）が上記ロードマップを説明

*1) *https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/index.html*
*2) *https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/005.html*
*3) *https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/029.html*

経産省が革新炉の海外市場獲得に意欲

- **原子力委員会は9月6日の定例会：経産省は革新炉技術開発の取組について説明*3。今後、海外プロジェクトへの効果的な参画を目指し、革新炉向けの機器や部素材の設計・開発・実用化に挑戦する炉型ごとの国内サプライヤチームを「革新サプライヤコンソーシアム」として認定し、支援する仕組みを構築(付録1参照)**
  *3) ***http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2022/siryo35/1-2_haifu.pdf***

- **英国との協力で日本の高温ガス炉技術の実証へ － 英国の高温ガス炉実証計画に採択 －。JAEAはNNLと協力して、我が国の高温ガス炉技術の高度化と英国での実証を進め、国際競争力の強化を目指す*4**
  *4) ***https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22090502/***

5.2　中国：*HTR-PM*

- ◆ 2008年　4月～2009年　9月　・設計審査(PSAR)
- ◆ 2012年12月　・コンクリート打設開始
- ◆ 2015年　6月　・原子炉建家完成
- ◆ 2016年　3月　・原子炉容器(RPV)据付(1基分)
- ◆ 2016年　9月　・RPV据付(1基分)
- ◆ 2017年　6月　・セラミック炉内構造物据付
- ◆ 2017年　7月　・燃料の大量製造開始(30万個/年)
- ◆ 2017年12月　・RPVの上鏡据付(1基分)
- ◆ 2018年　3月　・試験運転が許可される
- ◆ 2018年　9月　・SGの空気での圧力検査を実施し合格
- ◆ 2019年　7月　・2基目にSGを設置
- ◆ 2020年　3月　・2基目の機器類の接続完了
- ◆ 2020年 10月　・1基目の低温試験終了、2基目開始
- ◆ 2021年　1月　・高温・高圧(約250℃・7MPA)試験開始
- ◆ 2021年　8月　・蒸気タービンの試験完了、燃料装荷(1号機)
- ◆ 2021年　9月　・1基目：初臨界達成(9月12日午前9：35)
- ◆ 2021年11月　・2基目：初臨界達成(11月11日)
- ◆ 2021年12月　・グリッドに接続
- ◆ 2022年12月　・フルパワーに到達(電気出力等は不明)

主な出典：*WNN (https://www.world-nuclear-news.org/)*、*JAIF (https://www.jaif.or.jp/journal/news/)*

5.3　米国　（1）*ARDP*計画

年月	DOEの発表内容
2020年5月	➢ DOEは5月14日、国内原子力産業界による先進的原子炉設計の実証を支援するため、原子力局（NE）が担当する新しい「先進的原子炉設計の実証プログラム（ARDP）」を開始すると発表 **①「先進的原子炉の実証」ルート：5～7年の間に確実に稼働できるよう支援** ②「将来的な実証に向けたリスク削減」ルート：①より約5年延長し、5件を支援対象 ③「先進的原子炉概念2020（ARC20）」ルート：2030年代半ばの商業化を目標に開発を支援 *https://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1260006_4115.html*
2020年10月	➢ **①のルート*(Demonstration)*の選定** 1-1) テラパワー社が開発している「ナトリウム冷却高速炉」（Na炉） **1-2) Xエナジー社のXe-100。** 1-1)と1-2)とも2020会計年度から8,000万ドルずつ交付
2020年12月	➢ ②のルート***(Risk reduction)***の選定 2-1) ケイロス・パワー社による「フッ化物塩冷却高温炉の試験炉」でTRISO燃料・ペブル方式 2-2) WH社の極小原子炉「eVinci」、2024年までに実証炉開発することが目標 2-3) BWXT社の「BWXT先進的原子炉（BANR）」、TRISO燃料を使用 2-4) ホルテック・ガバメント・サービシズ社の「SMR-160」設計 2-5) サザン・カンパニー・サービシズ社の「溶融塩実験炉MCRE」高速スペクトル型溶融塩炉 *https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/5803.html*
	➢ ③のルート***(Concept development)***選定 3-1) アドバンスド・リアクター・コンセプツ（ARC）社の「固有の安全性を備えた先進的SMR」 3-2) GA社による「高速モジュール式原子炉（FMR）」 **3-3) マサチューセッツ工科大学（MIT）の「横置き式コンパクトHTGR」でモジュール方式** *https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/5854.html*
DOEのHP：	*Advanced Reactor Demonstration Program　Office of Nuclear Energy* *https://www.energy.gov/ne/advanced-reactor-demonstration-program*

5.3 （2）燃料開発 （1/2）

HALEU燃料(濃縮度～20%：High-Assay Low-Enriched Uranium)は、開発中の多くの先進炉設計で必要とされるが、米国ではまだ市販されていない。DOEの先進原子炉実証プログラム(ARDP計画)の下で資金提供のために選ばれた10の先進原子炉設計のうち、今後7年以内に建設される2基の実証炉を含む9基は、HALEU燃料を使用予定

西 暦	発 表 内 容
2019	10月：HALEU燃料の商業利用実施に向けた法案が下院通過 11月：Centrus社がHALEU燃料製造実証でDOEと3年契約を締結
2020	7月：「NELA」米上院可決。先進炉の実証やHALEU燃料の供給促進
2021	1月：「戦略ビジョン」(DOE) HALEU製造を2022年までに実証 6月：CentrusがHALEU燃料を製造する許可を取得 11月：インフラ投資雇用法が成立(原子力関係予算へも配分) 11月：オクロ社(オーロラ;HALEU燃料)とCentrusがHALEUサプライチェーンで協力
2022	3月：DOEの情報要求に対して、OranoはHALEU燃料生産に関して意見を提出 4月：ジョン・バラッソ上院議員はHALEUの国内供給を確保する法案を上院に提出 8月：米国インフレ削減法でHALEU燃料開発に7億ﾄﾞﾙ支援 11月：DOEがCentrus(子会社)にHALEU燃料実証への補助金交付(1億5,000万米ﾄﾞﾙ) 【来年末までに最大20kgのHALEUを、2024年も年間900kgのHALEUを生産】 12月：DOE がCentrus EnergyとのHALEU 契約を最終決定 12月：テラパワー社のNa炉計画、HALEU燃料を調達できず少なくとも2年延長

主な出典：*WNN（https://www.world-nuclear-news.org/）、JAIF（https://www.jaif.or.jp/journal/news/）*

5.3 （2）燃料開発 （2/2）

西暦	BWXT	X-energy(Xe-100)	USNC(MMR)
2018		3月：Centrusと燃料製造施設(TF3)建設に向けたサービス契約を締結 8月：TF3への公開会合 11月：Centrus社の支援を受けてTF3の予備設計を開始	
2019	10月：燃料製造設備を稼働 12月：燃料製造が順調に進展 (10月のニュースの継続)	3月：DOEがTF3建設に融資保証の適用申請の提出を要請 5月：NFIがXe-100用燃料製造に協力 11月：燃料製造に向けGNFと契約	
2020	3月：TCR用TRISO燃料の製造契約獲得 4月：燃料の製造再開後順調に進展 7月：燃料製造ラインの拡張・更新費をINLから獲得 11月：燃料製造ライン再稼働プロジェクトを完了し燃料を生産。3Dプリンターによる燃料等の製造技術を開発	5月：X-energy製造の燃料の性能確認でMITが協力 6月：X-energyとNFIが協力してHTGR用燃料を供給	2月：燃料製造研究でCNLと協力協定 9月：燃料開発研究施設をソルトレイクシティーに設置
2021		11月：Centrus社の支援を受けてTF3の予備設計を完了	4月：CNLがMMR用燃料(FCM燃料)の製造に成功
2022	**1月：INLの燃料製造のための契約を修正(全体契約額：3120万米ﾄﾞﾙ)** **6月：米国防総省がPeleプロジェクト(可搬式のマイクロ炉)にBWXTを選定** **12月：マイクロ炉用燃料の製造開始**	**4月：TF3敷地をオークリッジに決定。NRCにTF3のライセンス申請提出 2025年に操業開始予定** **10月：オークリッジでTF3着工**	**3月：オークリッジのパイロット燃料製造施設を今年に操業予定。3Dプリント技術でFCM燃料用のSiC製造** **8月：テネシー州オークリッジにパイロットTRISO燃料製造工場を開設**

主な出典：*WNN（https://www.world-nuclear-news.org/）、JAIF（https://www.jaif.or.jp/journal/news/）*

5.4　カナダ：*SMR*計画

カナダ原子力研究所（CNL）：2017年4月公表の「今後10年間の長期戦略」で、管理地(オンタリオ州チョークリバー)にSMR実証炉を2026年までに建設する目標を明示
高温ガス炉(4社：MMR, StarCore, U-Battery, Xe-100)等、計19社が関心を表明

SMR ロードマップ＊1 (2018年11月公開)	**国内に大きな潜在的SMR市場があるとし、ディーゼル発電等と競合できることを目指す** **(1) 遠隔地や鉱山の79か所(＞1MWe)** **(2) 重質油採取箇所の96か所(平均出力：210MWe)** **(3) 重工業への高温蒸気供給箇所(25～50MWe)の85か所** **(4) 既設石炭火力29基のリプレース(平均出力：343MWe)**
CNRI：開発支援イニシアチブ	➢ CNRIはカナダ政府・産業界がSMR開発ロードマップ＊1に基づき、CNLの知見や設備を産業界が活用したり、資金面で支援。2019年11月に4社(USNC等)が選定される＊2 ➢ CNRIの成果：2021年4月CNLでMMR用燃料ペレット(FCM燃料)の製造に成功＊3
規制側の活動 (2022年)	➢ 「SMRを安全かつ成功裏(経済性と期間)に設置するためには、規制当局の国際的な調和の必要性」との規制責任者の発言＊4 ➢ IAEAでの規制調和への活動＊5

*1) https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf
*2) https://www.jaif.or.jp/191120-a
*3) https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TRISO-fuel-made-in-Canada-for-first-time
*4) https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Viewpoint-The-nuclear-industry%E2%80%99s-need-for-harmonis
*5) https://www.world-nuclear-news.org/Articles/IAEA-initiative-to-accelerate-deployment-of-SMRs

カナダの4州、SMRの戦略的開発・建設計画を共同策定(2022年3月発表)
オンタリオ、サスカチュワン、ニューブランズウィックとアルバータの州政府は、SMR開発の道筋を示す共同戦略計画を発表。そこで、3つの方向性でSMR技術の開発・建設を推進し、カナダを世界的なSMR輸出国に
- **方向性1： 2028年までにダーリントン原子力発電所で建設する300MWe・SMRプロジェクト(GE日立)**
- **方向性2：ニューブランズウィック州で開発される2つの第4世代の先進的SMR**
- **方向性3：遠隔地等でのディーゼルと置き換えるSMR(MMR、2026年の稼働を目指す)**

https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Canadian-provinces-release-strategic-plan-for-SMRs

5.5　英国：*AMR*計画　（1）推進側の動向　（1/2）

項　目	内　容
最近の重要な政策と支援策	➢ 2020年11月：「緑の産業革命に向けた10ポイント計画」 ➢ 2020年12月：英国政府が「エネルギー白書」を発表 ➢ 2022年 4月 ：新たなエネルギー供給保証戦略(原子力拡大：ロシアのウクライナ侵攻の影響) 新規の原子力発電所建設プロジェクトの進め方を大幅に変更し、近々に1億2,000万ポンドの予算で「将来の原子力開発を可能にするための基金（Future Nuclear Enabling Fund）」を設置。また、開発プロセスの全段階で支援を提供する新しい政府機関として、年内にも「大英原子力（Great British Nuclear）」を立ち上げ、新設プロジェクトの投資準備等を支援 *https://www.gov.uk/government/publications/british-energy-security-strategy/british-energy-security-strategy* **AMR実証計画**：「緑の産業革命に向けた10ポイント計画」と「エネルギー白書」で誓約していた計画。2021年7月にBEISは**AMR実証計画(最大1.7億ポンド)**でHTGRを初号機とする案を公表 ➢ 英国の新設プラント支援：国内新規建設を支援する資金調達モデル（RABモデル）関連法案を提出。RABモデルは企業の投資リスクを軽減するもので、具体的には、 - 建設期間中から料金回収が可能で有り、資金調達も容易 - 売電価格は総括原価で設定され、投資回収が確実で有り予見可能性が高い
NIRABの活動	原子力イノベーション研究諮問委員会(**NIRAB：議長1名と委員10名**)は、原子力イノベーション研究局(NIRO：NNLがホスト)と協力して英国における原子力研究とイノベーションに関連する問題について閣僚、政府省庁に助言し、BEISや政府の政策立案等に大きく係わる。
主な出典： *WNN（https://www.world-nuclear-news.org/）、JAIF（https://www.jaif.or.jp/journal/news/）*	

注）2017年からの推進側及び規制側における革新炉(HTGR含む)の開発動向を付録2に示す。

5.5 （1）推進側の動向 （2/2）

*AMR（Advanced Modular Reactor）*実 証 計 画

Phase A (Pre-FEED)	*Pre-FEED Asessment*	*Phase B (FEED)*	*Phase C (Permissioning, Constrauction, Detailed Engineering & Operation)*

Spring 2022　Winter 2022　Early 2023(TBC)　Mid 2025(TBC)　Early 2030s(TBC)

FEED : Front-End Engineering Design(概念設計・FS後に行われる基本設計)，　*TBC : To be confirmed*

Advanced Modular Reactor (AMR) Research, Development and Demonstration Programme: Phase A competition

https://www.nirab.org.uk/cdn/uploads/attachments/amr-rdd-phase-a-competition-guidance.pdf

AMR実証計画Phase Aの選定結果(2022年9月2日公開)

- **1つ目の技術：高度な高温ガス炉技術の実証(4つのプロジェクト)**
- **2つ目の技術：被覆粒子燃料技術の実証（2つのプロジェクト）**

https://www.world-nuclear-news.org/Articles/UK-government-funding-for-advanced-reactor-develop

企業・団体	獲得額	実　施　内　容
(1) ***EDF***	499,737£	HTGR利用者の要件分析に焦点
(2) *NNL*、*JAEA*、*Jacobs*	**497,495£**	**HTGRの設計・建設と運転に関して、日本が確証済みの技術や革新的なアプローチを活用**
(3) ***U-Battery***	499,845£	英国内での実証に最適のサイズやコスト、輸送手段等を確定
(4) ***USNC***	498,312£	MMR技術に基づいて、英国産業界の状況や、高温熱の需要に最適なMMR＋を開発・実証

（5）*Springfields Fuels Ltd*：Urenco Limitedと共同で243,311£を受け取る

（6）*NNL*：Urenco LimitedとJAEA と共同で250,000£を受け取る

5.5 （2）規制側の動向

ONRはANT（先進炉に対する規制技術力）の開発を戦略的に実施 *https://www.onr.org.uk/advanced-nuclear-technologies/index.htm*	
2017年10月	グリーン成長戦略として政府は最大700万ポンド(ONRに500万ポンド、環境庁に200万ポンド)を投資し、ANTの開発を支援(規制当局への支援)
2018年9月	BEISは**AMRプログラム・フェーズ1(成立性評価)**として8つの組織を選定。2つが高温ガス炉 - U-Battery Developments Ltd,　- Ultra Safe Nuclear Corporation
2017年12月 ～ 2019年5月	**政府の「AMR研究イニシアチブ」に関して、規制の側面からアドバイス**。英国政府は2017年12月、AMR開発に利用できる最大£44mの研究開発資金を提供するイニシアチブを開始。これは正式にはAMRの実現可能性と開発(F&D)プロジェクト。ONRは、AMR F&Dプロジェクトにおいて、既存の規制ガイダンスに基づいて規制基準を策定し、**2019年5月に7つのベンダー(3つが高温ガス炉：DBD、USNC及びU-Battery）が提供する資料の評価を行い、BEISにアドバイス**をした
2020年7月	BEISは**AMRプログラム・フェーズ2**の資金調達を発表。3つのAMRプログラム(その一つがU-Battery)と英国企業への投資を支援。この投資には、英国の規制体制とANTに対する規制能力を引き続き強化するためのONRへのさらなる投資が含まる
取組み	➢ **ステイクホルダーとのコミュニケーション**：SMRやAMRを開発している産業界とのコミュニケーション。セミナーや1対1のワークシ ョップを通じて、ANT業界と関わるためのプロセスを開発し実施 ➢ **国際的な協力関係**：IAEA主催のSMR規制者フォーラムやNEAの先進炉の安全性に関するワーキンググループ等に積極的に参加。また、二国間協力として、カナダCSNCをはじめとする海外の規制当局や、JAEAやフランスIRSN等の主要な研究機関と協力関係を築く ➢ **規制プロセスとガイドの整備・改善**：ANTに関する作業の一環として、ガイド類の集中的なレビュー実施。2019/2020年に包括的設計審査(GDA)プロセスを近代化し、AMRがGDAに参入する可能性を考慮して、プロセスの効率性と柔軟性を高め、すべての利害関係者に対しての透明性と明確さを提供する**新しいGDA技術ガイドを発行**

5.5　（3）英国の取組み整理

項　目	取　組　み　内　容
重要な政策	➢ 「緑の産業革命に向けた10ポイント計画」や「エネルギー白書」 ➢ これらの原子力利用を拡大した「新たなエネルギー供給保証戦略(2022年4月)」
資金の支援 **&** **投資リスク軽減**	◆ 上記政策で誓約したAMR実証計画【最大1.7億ポンド、2021年7月にHTGRを選定】 サプライチェーンへの支援として別途0.4億ポンド ◆ 未来原子力実現基金(FNEF)【1.2億ポンド】とGreat British Nuclearの立上げ ◆ 核燃料基金【0.75億ポンド】はAMR(HTGR)も対象 ➢ **投資家や電気事業者の投資リスクを軽減する主な対策：** **- FIT−CfD制度(低炭素発電電力の差金決済取引(CfD)による固定価格買取制度(FIT))** **- 資金調達モデル（RABモデル）関連法案** **- 包括的設計認証審査GDA【事前審査で、早期に問題点を摘出。AMR(HTGR)も対象】**
規制の **近代化**	➢ ONRはAMR(HTGRも含む)に対する規制技術力の開発を戦略的に実施； - AMRに対する規制プロセスとガイドの整備・改善(AMR用のGDA技術ガイド等の発行） - ステイクホルダーとのコミュニケーションを積極的に実施 - IAEAやOECD/NEAの高温ガス炉を含めたSMRに関する活動への積極的な参加や、カナダ等の海外の規制当局とJAEA等の研究機関と協力関係を築く
国民との対話	➢ **政府方針**：英国政府はしばしば政策問題について国民の意見を聞く【コンサルテーション手法：政府の考え方を明示した上で、各々の論点において個別に質問。得られた意見に対して回答を作成し、改めて政府の結論を示す】。2021年の夏、「AMR開発及び実証(AMR RD&D)プログラムを支援するための高温ガス炉の可能性」に関して意見を求め、その開発を覆す意見(証拠)はなかった
主な出典： *WNN（https://www.world-nuclear-news.org/）、JAIF（https://www.jaif.or.jp/journal/news/）*	

6. おわりに

日本	➢ HTTRを用いた炉心冷却喪失試験@30%出力を1月に実施。4月にはJAEAと三菱が、カーボンニュートラル実現に向けたHTTR-水素製造実証事業を開始 ➢ 経産省・革新炉WGで、高温ガス炉などについて、2040～50年以降を見据え、導入までの時間軸をイメージした開発工程(研究開発、設計、製作・建設、運転など)を示すロードマップを提示。また、経産省が革新炉(主に水炉・高速炉)の海外市場獲得に意欲的
米国	➢ 「先進的原子炉設計の実証プログラム（ARDP）」で3ルート計10社を選定 ①「先進的原子炉の実証」ルートに2社：**X-energyの「Xe-100」**等 ②「将来的な実証に向けたリスク削減」ルートに5社：WH社の「極小原子炉 eVinci」等 ③「先進的原子炉概念2020」ルートに3社：**MITの「横置き式コンパクトHTGR」**等 ➢ 先進炉で使用予定のHALEU燃料開発は、商用規模での製造に向けて進展
カナダ	➢ SMR計画でUSNCのMMRが有望。4州がSMRの戦略的開発・建設計画を策定
英国	➢ 2021年、AMR実証計画で高温ガス炉を選定。2022年4月にAMR実証計画フェーズAコンペの内容とスケジュールを公表し、同年9月に6社(チーム)を選定。そのうち、2つが日英チーム【NNL, JAEA, Jacobs(原子炉)/Urecco(燃料)】 ➢ 英国の原子力開発は、推進側の強い意志(政策とそれを実現するための各種支援策)を感じ、規制側も高温ガス炉を含むAMRに対して合理的に規制できるよう準備 ➢ 高温ガス炉開発について国民の支持も得ており、ガス炉の経験・技術の蓄積のある英国において、**高温ガス炉の実現性は高い**と感じる

付録1　技術的側面からの情報整理の仕方

論 文 等 の 発 表 内 容 の 分 類

項目	内 容
国名	発表者の国/原子炉が設置される国
炉型	・ブロック型（B型）、ペブル型（P型）、判別不明（BP型） ・対象炉：具体名(HTTR，GTHTR300，HTR－PM等),一般炉（HTGR，VHTR等）
分野＊	分野1：燃料（燃料性能、製造・輸送、FP挙動、被ばく、高レベル廃棄物等） 分野2：黒鉛（材料特性、黒鉛構造物、炉心耐震、脱ガス、ダスト等） 分野3：金属（材料特性、高温機器（中間熱交換器、ガス循環機）等） 分野4：核（核特性、核計算、核データリブラリー等） 分野5：熱流動・安全(通常時や異常時の炉心ﾌﾟﾗﾝﾄ挙動、防災、核ｾｷｭﾘﾃｨ等） 分野6：その他原子炉関連（炉全体、計測・制御、照射試験、運転保守実績等） 分野7：熱利用系（ガスタービン発電、水素製造、熱供給配管等）
特記	課題、研究内容のポイント、シリーズ発表、論文等の特徴となる項目 （プルトニウム燃焼炉、確率論的リスク評価（PRA）等）

＊)分野は、高温ガス炉の特徴を考慮して分類

付録2　英国：推進側と規制側における開発動向

西暦	推進側(産業界：U-Battery等)	推進側(官公庁：BEIS等)	規制側
主な出典： *WNN（https://www.world-nuclear-news.org/）、JAIF（https://www.jaif.or.jp/journal/news/）*			
2017	**5月**：JAEAとURENCO社の協力開始。U-BatteryをJAEAが支援		
2018		**11月**：英国が先進炉技術政策を更新	**12月**：BEISがSMR等を包括的設計審査(GDA)の対象と明言
2019	**7月**：U-BatteryがカナダCNSCの事前審査VDRのフェーズ2開始	**7月**：METIとBEISはクリーンエネルギーイノベーションに関する協力覚書に署名	
2020	**7月**：同右(U-Batteryを建設現場から離れた所で製造する方法の概念開発・実証等に110万ﾎﾟﾝﾄﾞ) **10月**：BEISに対してU-Batteryへの支援を要求 **11月**：同右(800℃以上の高温でH2製造等の熱供給炉の開発を想定)	**6月**：NIRABは原子力政策に関する報告書「Achieving Net Zero」を公表 **7月**：政府AMR技術開発に4千万ﾎﾟﾝﾄﾞ投資。英首相、原子力への支持を表明 **10月**：JAEAと英NNLとの間で協力開始 **11月**：「緑の産業革命に向けた10ポイント計画」。英首相が原子炉の新設確約 **12月**：「エネルギー白書」	**10月**：カナダCNSCと英ONRの規制側の協力関係 **11月**：JAEAと英ONRで情報交換の取決
2021	**4月**：U-Battery；H_2経済への先進炉の役割を主張 **5月**：【英Penultimate PowerがJAEAの協力で許可取得を目指す】 **9月**：U-BatteryとCavendishが原子炉のモックアップを公開	**7月**：BEISはAMR実証計画でHTGRを初号機とする案を公表 **8月**：英政府H_2経済への原子力の役割 **12月**：BEISエネルギー相がAMR実証計画でHTGRを選択したと発言	**5月**：BEIS、GDAの対象にAMRも含める
2022	**5月**：CavendishとX-energyとAMR実証計画へ **10月**：WestinghouseがTRISO製造研究で英政府から資金を得る	**2月**：BEISがAMR実証計画で産業界と情報交換 **4月**：BEISが新たなエネルギー供給戦略を公表 **7月**：BEISが原子燃料基金を立上げ予定 **9月：BEISがAMR実証計画Phase A選定(6つ：日英チーム(NNL,JAEA,Jacobs/Urecco))** **12月**：BEISがHTGR研究に6千万£資金提供	

注）　英国で開発しているU-Batteryは付録3に、英国から日本への東海炉輸出は付録4に示す。

付録3　英国の*U-Battery*

主な仕様	1ユニットに原子炉2基。熱出力：10MWt/基、電気出力:4MWe/基、1次冷却材はヘリウム、2次冷却材は窒素ガス（水は使用しない）、被覆燃料粒子を使用しブロック型炉心。原子炉出口温度750℃

項　目	内　容　（出典：*https://www.u-battery.com/*）
体制組織	➢ 英国原子燃料大手Urencoの子会社（U-Battery Ltd）が開発 ➢ 職員数は19名。支援組織として、Jacobs：4名、Kinetrics：2名、Cavendish：1名、Costain：2名、Rolls-Royce：1名、NNL：1名、BWXT：2名及びマンチェスター大：1名と、計8機関・14名。総勢33名
市場	➢ 英国とカナダの2カ国を市場として選定し、両国での2020年代後半までの初号機の建設を目指す ➢ 英国では政府のAMR開発資金の援助、カナダではカナダ原子力研究所（CNL）チョークリバーサイトにおけるSMR実証プロジェクトに応募
協力関係	➢ 原子炉システムと安全性はJacobsとCavendish、**燃料関係はBWXT**とNNL、主要部品はロールスロイスなどが協力 ➢ 日本とは2017年5月に、JAEAと協力覚書を締結
進捗状況	➢ **<u>英国での状況</u>**： - 2018年後半、U-BatteryはAMRプログラムのフェーズ1に選定(8件選定)される - その設計のための技術的及び商業的なケースを想定してFSを実施し、予定通りに政府に提出 - 2020年7月、U-BatteryはAMRプログラムのフェーズ2に進み、新しい原子力技術を市場に投入する次のステップである設計と開発作業を行うための資金を獲得 **- 2022年9月、AMR実証計画の*Phase A (Pre-FEED)*に選定される** ➢ **<u>カナダでの状況</u>**： - 2019年7月、U-Batteryはカナダ原子力研究所(CNL)の評価プロセスの第1段階を完了 - U-Batteryは、カナダ原子力安全委員会(CNSC)と、事前審査フェーズ1のサービス契約を締結 - U-Batteryは、Canadian Nuclear Association(カナダ原子力協会)、Organization of Canadian Nuclear Industries(カナダ原子力産業機構)等のメンバーでもある

付録4　東海1号炉(日本への輸出)（1/2）

項　目	内　容
輸入までの経緯	**昭和32年版原子力白書:輸入までの経緯** *http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1957/index.htm* ➢ 31年1月原子力委員会が設置された頃から、発電用原子炉に関して論議。同年5月、英国原子力公社クリストフアー・ヒントン卿の来日により実用原子力発電は身近かなものに ➢ 31年10月英国に調査団を派遣。「地震対策その他の安全対策や経済上の点について今後さらに検討をくわえ、満足な結果がえられれば、コールダーホール改良型の原子力発電所はわが国に導入するのに適するものの一つである」と32年1月に報告 ➢ 32年11月に受入体制として日本原子力発電会社(原電)を設立
契約や安全審査等の経緯	**昭和34～35年版原子力白書:英国との契約や安全審査等の経緯** *http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1959/index.htm* ➢ コールダーホール改良型動力炉(東海1号炉)の購入に関し、英国側と原電との間で長い交渉 ➢ 安全性の面から国内でも種々論議。主な問題は、 - 炉心は黒鉛ブロックを積みあげたものであるから耐震性が弱い - 黒鉛の照射収縮、燃料の燃焼度3,000MWd/tまでのデータや中空燃料の使用実績がない - 正の温度係数になることなど 原電は、これらの問題について、設計変更等によっていずれも十分解決しうるものであるとして、34年4月GECに対して発注の意思表示書に署名し提出。政府に対して、34年3月東海1号炉の原子炉設置許可申請書及び電気事業経営許可申請書を提出 ➢ 政府は34年12月14日付で原電の東海1号炉について内閣総理大臣名でその設置を許可するとともに、通商産業大臣名で電気事業許可を行なった ➢ 原電は正式許可にともなって34年12月22日GECと本契約に正式調印。引き続き富士電機製造(株)とGECと間に国産部分に関して契約(GECが富士電機との技術提携を希望)。その後35年6月政府は両者間の「原子炉製作に関する技術援助契約」を認可

付録4　東海1号炉(日本の高温ガス炉開発への影響)（2/2）

項　目	内　容
ブロック型炉心の耐震研究	➢ 英国からの輸入に際しての安全上の重要な問題は、四角柱状ブロック炉心の耐震性。この地震対策としては、四角柱状ブロック炉心を側面キー構造付き六角柱状ブロック炉心に変更 ➢ この経験を踏まえ、電源開発(J-Power)、武藤構造力学研究所などは高温ガス炉炉心ブロック群の耐震研究を進め、JAEAが有する垂直2次元炉心モデルの解析コードSONATINA-2Vと同等の解析コードCOLLAN2-Vを開発 *https://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/1977/10/1977_10_01.pdf*
黒鉛材料の受入れ検査	➢ 東海1号炉は六角柱状黒鉛ブロックの受入れ検査で、ブロック側面のキー構造に設計荷重をベースに負荷するプルーフ試験を実施(実機で負荷試験) ➢ 実機黒鉛ブロックにある程度の荷重を負荷すると強度が低下する可能性があることから、HTTRはこれに代わる方法として超音波(UT)や渦電流(ET)の非破壊検査を導入 *https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAERI-M-91-102.pdf*
黒鉛材料の供用中監視	➢ 東海1号原子力発電所の原子炉にはフランスのSERS社(Pechiney-Ugine-Kuhlmann系)製の黒鉛材料Q1とQ3が約1,600ton使用。総数約3万個の六角柱状黒鉛ブロックが直径14m、高さ8mの円筒柱状に積み上がって炉心を構成 ➢ 炉心で使用されている黒鉛材料のモニタリングは、原子炉の定期検査の時、旧日本原子力研究所で実施され、安全性を確認 *https://www.jstage.jst.go.jp/article/tanso1949/1980/101/1980_101_77/_pdf/-char/ja*