

新型炉部会セッション

原子カイノベーションを支える最新の新型炉開発の状況

Latest trends of advanced reactor development supporting nuclear innovation

(2) 早期実用化と機動的運用が可能な蓄熱型小型モジュール高温ガス炉

(2) Early Deployable Small Modular HTGR Plant with Heat Storage System

*鈴木 哲¹, 神保 昇¹, 藤原 斉二¹, 田邊 賢一², 田澤 勇次郎², 定廣大輔²,¹東芝エネルギーシステムズ株式会社, ²富士電機株式会社

1. 緒言

高温ガス炉は、高い安全性（①自然に炉停止、②自然に冷却、③高い放射性物質閉じ込め能力）を有し、高い出口温度を活かした熱利用による温室効果ガス排出量削減、さらには二酸化炭素を排出しない水素製造熱源として水素社会の実現といった多方面への貢献が期待されている原子炉であり、日本では国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）を中心として研究開発が進められている。JAEA が所有する高温工学試験研究炉（以下、HTTR）は東芝エネルギーシステムズ（以下、東芝 ESS）、富士電機株式会社（以下、富士電機）をはじめとする国内メーカーによって設計、建設され、平成 10 年に初臨界、平成 16 年に世界で初めて 950℃のヘリウムガス取り出しに成功するなど、高温ガス炉の基盤技術の確立に向けた研究開発の中心的な役割を担っており、高温ガス炉技術は我が国が原子力安全に関する分野で世界に貢献し得るポテンシャルを有する原子力システムのひとつと考えられる。また、東芝 ESS では、水を原料とし、高温ガス炉を熱源とした高温水蒸気電解法による CO2 フリーの水素製造技術の開発を推進しており、高温ガス炉利用の有力なオプションと考えている。

東芝 ESS と富士電機は、HTTR 建設後も小型高温ガス炉 HTR50S[1]の概念設計を JAEA の下で実施する等、高温ガス炉開発を継続しており、現在、共同で早期実用化と機動的運用が可能な蓄熱型小型モジュール高温ガス炉の開発を実施している。東芝 ESS は全体システム取り纏め、冷却系等を担当し、富士電機は炉内構造物、蓄熱システム等を担当している。また、電力事業者によるレビューや外部有識者委員会による安全設計レビュー、プラント仕様レビューを適宜実施している。

本発表は、上記蓄熱型小型モジュール高温ガス炉プラントの概要と、実用化に向けた取り組みについて報告する。

2. プラント概要

2-1. プラントシステムの全体概要

本発表の高温ガス実用炉は、2030 年代に想定される高温ガス実用炉建設を視野に入れ、高温ガス炉固有の安全性を活かした設計を行うことにより社会受容性を持つこと、確立した技術を採用することで早期実用化と開発費圧縮を行うことをコンセプトとして設定した。更に、太陽光発電等、再生可能エネルギー（以下再エネ）普及時代に、再エネと共存可能な出力可変システム（蓄熱システム）を備えることとし、プラント概念を構築した。表 1 に HTTR と本発表の高温ガス実用炉の仕様比較を示す。

早期実用化の観点から、原子炉本体は JAEA で開発された GTHTTR300[2]と同等の仕様とし、スケールメリットを活かすため、熱出力は安全性を維持できる範囲で最大を目指し 600MWt とした。HTTR と比較して冷却材圧力を 2 倍以上高く設定して除熱能力を向上させており、出力密度も 2 倍以上として炉心小型化による経済性向上を目指している。また、平均燃焼度も 5 倍以上とし、燃料交換間隔を広げている。

GTHTTR300 の原子炉システムは高温ガス炉固有の安全性を備えており、事故時においても放射性物質の放出を最小限に抑え周辺住民の避難対応の負荷を大幅に低減する原子炉システムを構築することが可能と考えられ、社会受容性に優れている。固有安全性を活かして、HTTR で使用された鋼製原子炉格納容器を排した閉じ込め概念（コンファインメント）を採用するとともに、原子炉圧力容器（以下、RPV）と蒸気発生器（以下、SG）を横並びに配置（サイド・バイ・サイド）して高温二重配管を短縮することにより経済性向上を考

慮している。なお、図1に示す蓄熱システムありの場合はSGの代わりに中間熱交換器が配置されるサイド・バイ・サイド構成になる。更に、二重配管の外管を圧力容器として扱うスリーベッセル概念の導入により、供用期間中検査を行うことで二重管破断回避を図り、安全性向上にも配慮している。RPV周辺には空冷自然循環による炉容器冷却設備を設置し、受動的なRPV冷却を行う。

経済性向上の観点では、原子炉出口温度をGTHTR300の850°Cから750°Cに低下させることで、RPVの材料を、廉価かつ既設軽水炉での使用実績のあるマンガン・モリブデン鋼に変更する等、コストダウンしている。また、発電システムもコンベンショナルな蒸気タービン発電を選択し、開発費を圧縮しているが、原子炉出口温度は750°Cでも蒸気発電には十分であるとともに、蓄熱システムとの整合性もよく、既設軽水炉の平均的な発電効率33%程度に対して42%（蓄熱なしの場合）を達成し、経済性向上に寄与している。なお、海外の設計例では、建設中である中国のHTR-PM炉や米国NGNP(Next Generation Nuclear Plant)に採択されたSC-MHRが、成熟した技術として原子炉出口温度750°C及び蒸気発電を採用している[3]他、近年、SMRとして米国・英国・カナダ等で開発されている高温ガス炉の多くも同様の温度・発電システムを採用している[4]。更に、600MWtの原子炉システムを1モジュールとして、4モジュールで2400MWtのプラントを構成する想定であり、モジュール化による量産効果と蒸気タービンのスケールメリットを考慮すると、経済性向上を期待できる。

再エネと共存可能な電気出力可変システムとしては、太陽熱発電で実績のある熔融塩蓄熱システムを選択した。原子炉出力は一定を維持し、蓄熱タンクへの蓄熱と二次側(蓄熱システム側)の流量調整のみで再生可能エネルギーの出力変動による電力需要変動に応じた発電量の調整が可能なシステムを検討した。

図1に現在検討している蓄熱システムを備えたモジュール型高温ガス炉の概念を示す。

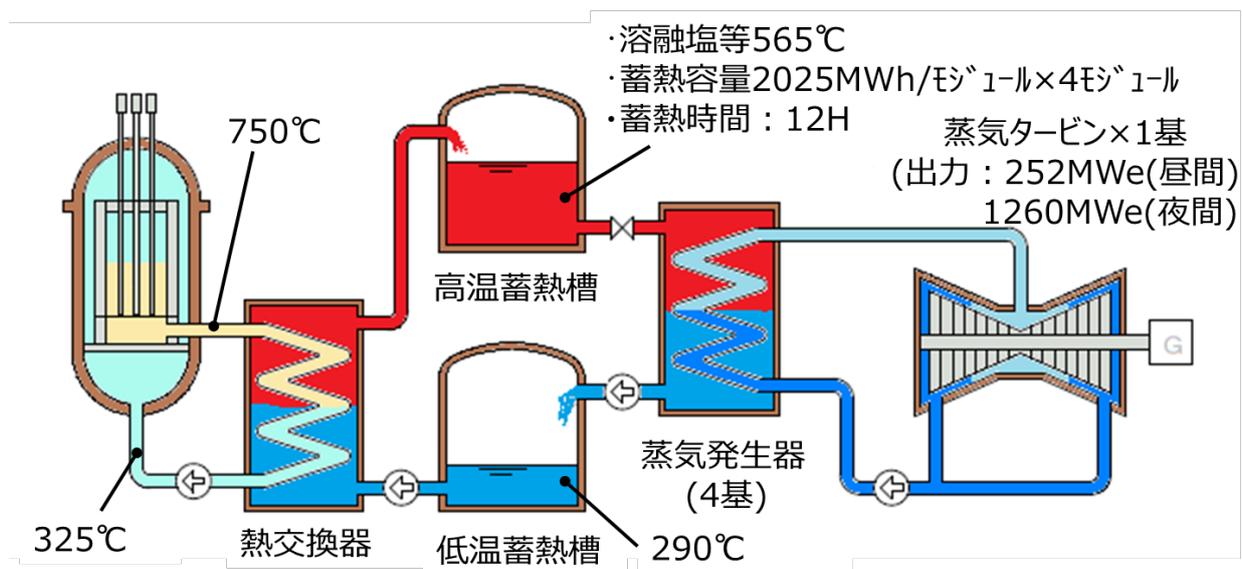


図1 蓄熱システムを備えたモジュール型高温ガス炉

主要目	HTTR	実用炉	変更の考え方
原子炉熱出力	30MW	600MW	熱出力の最大化
冷却材	ヘリウムガス		同じ
原子炉入口温度	395℃	325℃	高温化による技術課題を回避し、実用的な選定
原子炉出口温度	850(950)℃	750℃	
冷却材圧力	4MPa	7MPa	高圧化によるコンパクト化
炉心構造材	黒鉛		同じ
炉心有効高さ	2.9m	8.4m	出力増加による大型化
平均燃焼度	22GWd/t	120GWd/t	JAEA殿開発中
出力密度	2.5MW/m ³	5.8MW/m ³	JAEA殿開発中
燃料	二酸化ウラン・被覆燃料粒子/黒鉛分散型		同じ
燃料体形式	ピン・イン・ブロック型		同じ
原子炉圧力容器	2・1/4Cr-1Mo鋼	Mn-Mo鋼	軽水炉の実績（材料）
原子炉圧力容器内径	5.5m	7.6m	出力増加による大型化
発電方式	—	蒸気タービン	発電機能を追加
閉じ込め機能	鋼製格納容器	コンファインメント	コスト低減等
炉容器冷却設備	強制水冷	空冷自然循環	パッシブ化による信頼性向上

表 1 原子炉系の基本仕様

2-2. 蓄熱システムの概要

蓄熱システムは、高温ガス炉発電プラントに再エネの電力需給変動に対する調整力を与えることを目的とし、原子炉系と蒸気タービン発電系の間にアドインする。現時点では、原子炉および蓄熱システムを4モジュール、蒸気タービン1ユニットのマルチモジュール原子炉プラントを想定した。SGは4基、タービン建屋側に付属する。原子炉から蓄熱システムの範囲は共有せずにモジュールごとに独立した設備とすることにより、プラント全体出力の要求に応じたモジュール数の設定や原子炉ごとのメンテナンスを可能とした。また、蓄熱システムがある場合、1次冷却系とSGは直接接続しないため、SGの伝熱管破損による1次系への水侵入を想定する必要はなくなる。このため、水侵入による1次冷却材圧力の上昇、反応度添加、黒鉛酸化による炉心及び炉心支持構造物への悪影響については想定が不要となる。その他の安全シナリオについては蓄熱システムの有無で大きく変わらない見通しである。

また、原子炉出力は一定運転を維持しながら、負荷要求に応じて蓄熱システムから水・蒸気系への熱供給量と水・蒸気系流量を増減させて発電量を調整することで、稼働率を下げずに発電調整可能としている。本システムの出力変更パターンを図2に示す。現状では、すでに太陽光発電等の出力制御が行われており、電力需給状況としては、日負荷で見た場合、太陽光発電の発電量の小さい朝及び夕方には需要が高く、太陽光発電の発電量が増加する昼間は供給が多くなっている。これらの状況を考慮して、6:00～18:00等を蓄熱需要があると想定して、蓄熱時間は12時間を基本とした。図2に示す出力変更パターンは、昼間の太陽光発電がピークになる時間帯は本プラントのタービン出力を下げ蓄熱を主とし、夜間はタービン出力を増加させる三角パターンとした。なお、現時点では、最低出力はタービンを停止しない20%で設定しているが、蓄熱容量が増加しない範囲では蓄熱時間等の調整は可能である。

本蓄熱システムの主な構成は高温蓄熱槽と低温蓄熱槽から構成される2タンク方式とした。海外の太陽熱発電プラントで実証済みであり、技術的成立性等の課題はないと考えられ、早期に採用可能である。高温ガス炉の炉心出口温度750℃に適合する蓄熱媒体としては熔融塩(ソーラソルト：60wt.%NaNO₃ / 40wt.%KNO₃)を採用するとともに、ソーラソルトの耐熱温度や融点を考慮して、高温槽565℃/低温槽290℃の温度条件を設定した。本温度については、太陽熱発電の海外実証施設で実証例があり、技術的に採用可能である。

2021年秋の大会

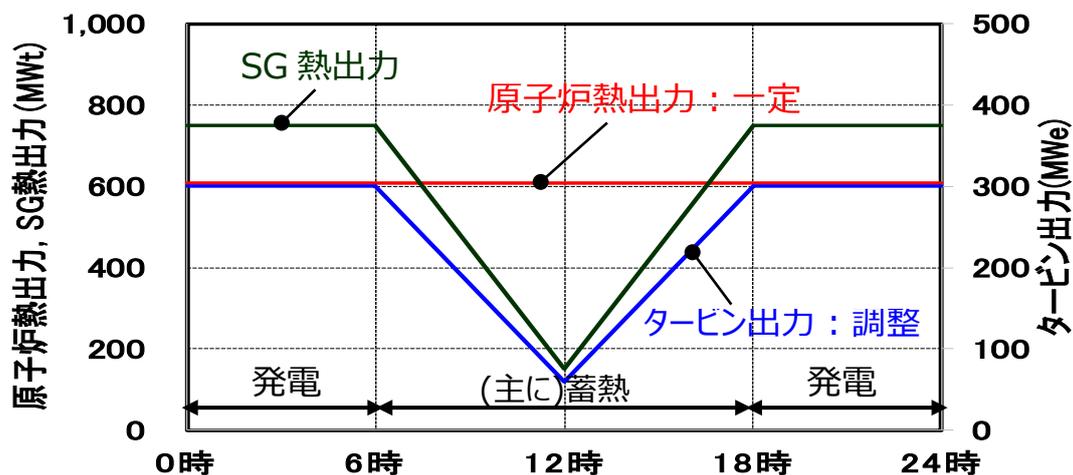


図2 蓄熱システムの出カパターン

2-3. プラント配置概念

図3に蓄熱システムと組み合わせた高温ガス炉蒸気タービン発電プラントの鳥観図を示す。

原子炉建屋には600MWtの原子炉とヘリウム-溶融塩熱交換器を1セットとしたモジュールが4基設置され、周辺部には4モジュールの共用設備である放射性廃棄物廃棄施設、燃料取扱及び貯蔵設備、制御室等を設置する。原子炉建屋は地下6階、地上3階の建屋構成とし、平面寸法は約83m×約74mになる見通しである。タービン建屋には4基のSGと、蒸気タービン1基及び発電機、復水器、給水加熱器等が設置される。なお、蓄熱システムがない場合には、原子炉建屋内の熱交換器がSGに置き換わるが、熱交換器とSGの寸法はほぼ同じになる見通しであるため、原子炉建屋寸法は変更されない想定である。

蓄熱槽は原子炉モジュール1基につき高温と低温の2基が必要なので、合計8基となる。蓄熱槽の容量は、海外実証プラントの設計を参照し、高温側溶融塩温度565℃、低温側溶融塩温度290℃、蓄熱容量2025MWh、蓄熱12時間として評価したところ、約26,000トン/槽となった。蓄熱槽は、内径45m、高さ15mの円筒構造物になる見通しである。

以上に加え、搬出入建屋、海水熱交換器建屋、補助ボイラ建屋、給排水処理建屋、開閉所、排気筒などを考慮した結果、図3に示すプラントの敷地面積は350m×450mとなった。

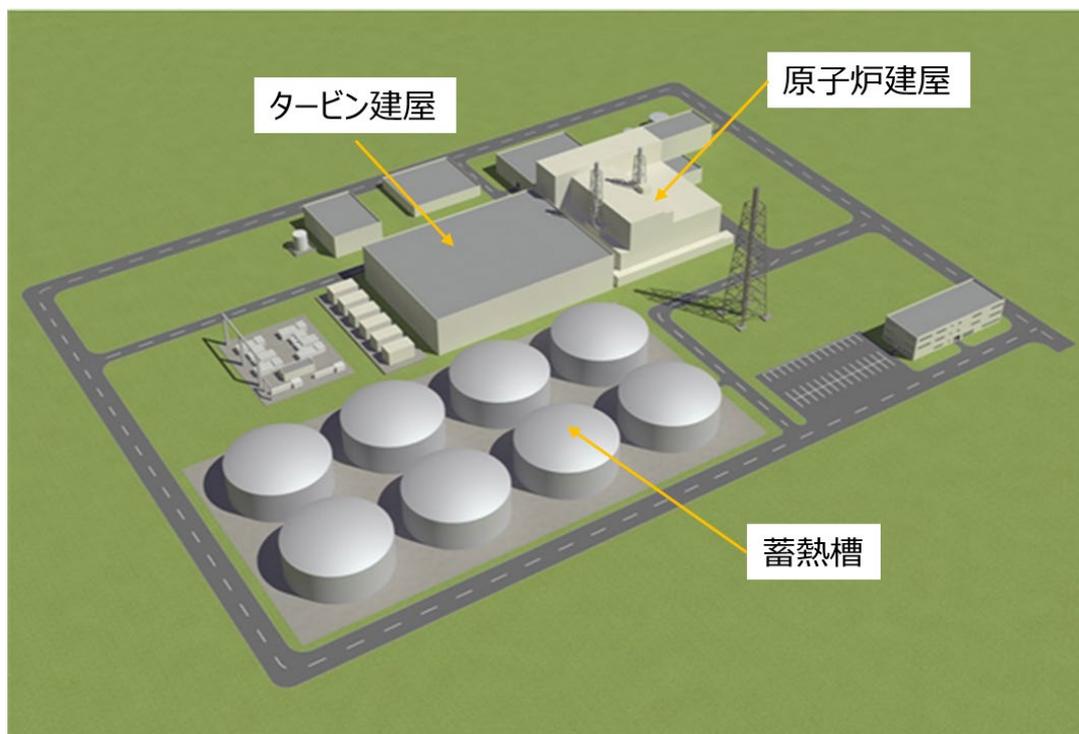


図3 蓄熱システムを備えた1GWe級蒸気タービン発電プラントの鳥観図

3. 実用化に向けた取り組み

前項までに述べた高温ガス実用炉の概念を実用化するにあたっては、規制への適合性が求められるため、既存の実用発電用原子炉の規則（「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」）の基本的な構成を変えずに、解釈等の説明を考慮し、試験炉用の規則、先行研究を参照して高温ガス炉の特徴を考慮した規則案（安全設計の方針、要件案）を検討した。その結果、設計基準対処設備等の主な条文は高温ガス炉固有の記載に変更することで、規制主旨に大きな変更はなく対応可能であることを確認した。また、重大事故を防止する重大事故対処設備に関しては、対処すべき事象について高温ガス炉固有の記載に変更するとともに要件も変更する必要がある、重大事故が発生した場合における規則については、高温ガス炉の特長を考慮して変更することも必要である。

実用化においては高温ガス実用炉の安全性を示すことも必要であり、まず、マスターロジックダイアグラム手法による安全評価事象の抽出を行った。今回は、被覆燃料粒子、原子炉冷却材圧力バウンダリを中心に放射性物質の放出に至る異常事象を抽出し、既設炉、既往研究を参考にグループ化（純化系、気廃系、燃取系は別途検討）を行い、代表事象を選定した。選定された代表事象は、出力増加事象（制御棒の誤引き抜き）、1次冷却材流量減少（主循環ポンプ故障）、除熱機能喪失（水・蒸気系異常）、外部電源喪失、1次冷却材喪失事故、SG 伝熱管破損事故、炉内局所閉塞事故の7つである。

次に、7つの起因事象について、イベントツリー作成を作成した。事故シーケンスの考え方として、原子炉トリップに失敗しても固有安全性により低出力静定となる。また、残留熱除去系の起動に失敗した場合でも、制御棒等が挿入され炉停止していれば、放熱によっても炉心損傷は回避できる設計が可能であり、その方針で進めている。ただし炉容器健全性の判断基準、補助冷却系の維持等については今後検討の必要がある。SG 伝熱管破損の水侵入事故、1次冷却材喪失事故（空気侵入事故）については炉停止、除熱に成功しても一部放射性物質がコンファインメント内に流出する可能性があり、イベントツリーでは放射性物質放出の可能性のある事象については被ばく評価が必要とされるため、今後、定量的な検討を進める。

以上は、蓄熱システムなしで原子炉と SG が直結する系統構成に関する検討であるが、蓄熱システムありの系統構成でも大きな変更はない見通しである。

4. 結言

令和元年～2年に、東芝 ESS と富士電機は蓄熱システムを備えたモジュール型高温ガス炉の概念検討を実施した。本検討では、早期実用化に向け、黒鉛減速・被覆燃料粒子・ヘリウムガス冷却など確立済の高温ガス炉技術を踏襲するとともに、蒸気タービン発電を採用して開発リスクを排除、原子炉出口温度を 750℃として圧力容器に軽水炉で実績のある材料を採用し、固有安全性を活かしてコンファインメントを採用するなど経済性を向上させた高温ガス実用炉の実現に向けた見通しを得た。蓄熱については電力需要の日変動を吸収できるシステム構成を検討した今後も高温ガス炉の特長を生かして、安全性と経済性に優れ、早期実用化可能な高温ガス炉システムの検討を継続し、2030年代の実用化に向けて開発を進めていく。

5. 参照

- [1] 大橋弘史ほか、開発途上国向け小型高温ガス炉の概念設計、FAPIG No. 191 (2016-2)
- [2] 國富一彦ほか、高温ガス炉ガスタービン発電システム（GTHTR300）の設計研究、日本原子力学会和文論文誌，Vol.1, No.4, 2002, pp. 352-360
- [3] 経済産業省、原子力の利用状況等に関する調査(革新的原子炉の研究開発動向等に関する調査)報告書平成 29 年度、3-85~95
- [4] IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 2020 Edition, pp. 135-194

謝辞

本報告は、経済産業省からの補助事業である「令和 2 年度 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」の一環として実施した成果を含む。

*Tetsu Suzuki¹

¹Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation.