

2024年度夏期休暇実習報告

Report of Summer Holiday Practical Training on 2024

長谷川 俊成 長住 達 石塚 悦男 江頭 慶一郎
古屋 碧海 安藤 涼太 坂口 旺 櫻井 洋亮
中野 優美 飯垣 和彦

Toshinari HASEGAWA, Satoru NAGASUMI, Etsuo ISHITSUKA, Keiichiro EGASHIRA
Aoi FURUYA, Ryota ANDO, Akira SAKAGUCHI, Yosuke SAKURAI
Yumi NAKANO and Kazuhiko IIGAKI

大洗原子力工学研究所
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR
Oarai Nuclear Engineering Institute

July 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

2024 年度夏期休暇実習報告

日本原子力研究開発機構
大洗原子力工学研究所
高温工学試験研究炉部

長谷川 俊成、長住 達、石塚 悦男^{*1}、
江頭 慶一郎^{*2}、古屋 碧海^{*2}、安藤 涼太^{*3}、坂口 旺^{*4}、
櫻井 洋亮、中野 優美^{*5}、飯垣 和彦

(2025 年 3 月 25 日受理)

「HTTR に関する技術開発」をテーマとした 2024 年度夏期休暇実習において、3 つの大学から 4 名が参加した。参加者は、HTTR 炉心の解析、一次冷却系統の ^{137}Cs 沈着挙動解析、高温ガス炉を利用した原子力ロケットの概念検討について実習した。実習後のアンケートでは、就業体験として有益であったこと、職員とのコミュニケーションをとる機会が多かったので有意義な実習になった等の感想があり、本実習は概ね良好な評価を得た。

大洗原子力工学研究所: 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

*1 高温工学試験研究炉部(2024 年 12 月まで)

*2 九州大学

*3 北海道大学

*4 東京都市大学

*5 株式会社ソフィアシステム

Report of Summer Holiday Practical Training on 2024

Toshinari HASEGAWA, Satoru NAGASUMI, Etsuo ISHITSUKA^{*1},
Keiichiro EGASHIRA^{*2}, Aoi FURUYA^{*2}, Ryota ANDO^{*3}, Akira SAKAGUCHI^{*4},
Yosuke SAKURAI, Yumi NAKANO^{*5} and Kazuhiko IIGAKI

Department of HTTR,
Oarai Nuclear Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 25, 2025)

Four people from three universities participated in the 2024 summer holiday practical training with the theme of “Technical development on HTTR”. The participants practiced the analysis of the HTTR core, the analysis of ¹³⁷Cs deposition behavior in the primary cooling system, and the feasibility study of nuclear rockets using HTGR. In the questionnaire after this training, there were comments from participants that it was beneficial as a work experience and that it was meaningful because of many opportunities to communicate with staff. These impressions suggest that this training was generally evaluated as good.

Keywords: Summer Holiday Practical Training, HTTR, Core Calculation, MVP-BURN, ¹³⁷Cs
Deposition Behavior, Nuclear Rockets

*1 Department of HTTR until December, 2024

*2 Kyushu University

*3 Hokkaido University

*4 Tokyo City University

*5 SOFIA SYSTEM Co., LTD.

目 次

1. 序論	1
2. HTTR の炉心解析	1
2.1 可燃性毒物変更の影響	1
2.2 反応度係数の評価	2
3. 一次冷却系統の ^{137}Cs 沈着挙動解析	3
4. 高温ガス炉を利用した原子力ロケットの概念検討	3
5. 夏期休暇実習のアンケート結果	7
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. HTTR core analysis	1
2.1 Impact of changing burnable poison	1
2.2 Evaluation of reactivity coefficients	2
3. Analysis of ^{137}Cs deposition behavior in primary cooling system	3
4. Feasibility study of nuclear rockets using HTGR	3
5. Questionnaire results for summer holiday practical training	7
Acknowledgements	8
References	8

This is a blank page.

1. 序論

日本原子力研究開発機構(原子力機構)の夏期休暇実習は、大学等の学生が夏期休暇期間を活用して原子力機構で就業体験できる制度であり、高温工学試験研究炉部では高温工学試験研究炉(HTTR)¹⁾に関連するテーマを取り上げて夏期休暇実習生を募集してきた。2017 年度から夏期休暇実習に参加した学生等の所属及びその人数を Table 1.1 に示す。2024 年度は 3 つの大学から 4 名が参加した。

2017 年度から 2020 年度の夏期休暇実習では、小型モジュール炉(SMR)²⁻⁴⁾の実用化に向けた開発が進展していることから、HTTR の炉心を SMR に例えて、熱電素子による発電と熱の直接的な利用を想定した原子力電池⁵⁾等について検討してきた⁶⁻⁸⁾。2021 年度には、HTTR の運転が再開され、炉心の核的パラメータが約 10 年ぶりに取得されたため、HTTR の炉心計算体験も兼ねて臨界制御棒位置及び動特性パラメータ等について検討した⁹⁾。2022 年度からは、学生の希望も踏まえて、HTTR の炉心解析のみでなく、²⁵²Cf 製造の検討、冷却機能喪失時の挙動解析、炉容器近傍の熱流動解析、一次冷却系統のヨウ素沈着挙動解析、高温ガス炉用エネルギー貯蔵システムの概念検討等の様々なテーマで夏期休暇実習を実施してきた^{10,11)}。2024 年度は、HTTR の炉心解析、一次冷却系統の¹³⁷Cs 沈着挙動解析、高温ガス炉を用いた原子力推進宇宙船の概念検討をテーマとして夏期休暇実習を実施した。実習期間、実習テーマ及びその担当等の情報を Table 1.2 に示す。

本報告書では、2024 年度の実習概要を紹介するとともに、本実習を改善するために実施したアンケート調査結果等についても報告する。

2. HTTR の炉心解析

本年度は、MVP 及び MVP-BURN コードによる計算実習を目的として、HTTR の可燃性毒物をホウ素からリチウムに変更した場合の影響及び燃焼に伴う反応度係数の変化について検討した。

2.1 可燃性毒物変更の影響

核融合炉の初装荷燃料として大量のトリチウムが必要となるが、このトリチウムの確保方法として実用高温ガス炉を利用したトリチウムの製造方法が提案されている¹²⁾。この方法は、実用高温ガス炉の黒鉛ブロックに装荷する反応度調整用の可燃性毒物 B₄C を LiAlO₂ に置き換えることで⁶Li(n, α)³H 反応によりトリチウムを製造するものであり、実用高温ガス炉の通常運転時に付加的にトリチウムを製造できる特徴がある。本方法を実用高温ガス炉(600 MWt)に適用した場合、炉心の燃焼特性を大きく変えることなく、360 日間の運転で 600 g 程度のトリチウムが製造できることが解析的に示されている¹³⁾。なお、本方法によれば、2 GWt 程度の核融合炉に必要な初装荷トリチウムを実用高温ガス炉 5 基で 1 年間運転すれば確保できることになる。

本実習では、上記と同様な考え方にに基づき、HTTR を用いた場合にどれ程のトリチウムが製造できるかを検討するため、HTTR の可燃性毒物 B₄C を LiAlO₂ に変更した場合の実効増倍率(k_{eff})への影響

を調べた。HTTR 炉心部の概要を Fig. 2.1 及び Fig. 2.2 に示す。なお、 ^{10}B 及び ^6Li の反応断面積は、約 3800 barn 及び約 940 barn である¹⁴⁾。

燃焼計算には MVP-BURN(核データライブラリ:JENDL-4.0)を用い、HTTR 全炉心モデルで計算した。また、解析条件は、原子炉出力を 100 % (30 MW)、燃焼期間を 660 日、制御棒位置は燃焼期間を通して全引抜き位置(460cm)で固定として計算した。

可燃性毒物の形状を変えずに B_4C から LiAlO_2 [^6Li 濃縮度:天然(7.5 %)]に変更した場合の計算結果を Fig. 2.3 に示す。 B_4C から LiAlO_2 に変更した場合の運転初期の反応度は、 B_4C ほど下げることができなかった。このため、 LiAlO_2 の形状を円柱から円筒とし、 ^6Li 濃縮度を下げたケースについて検討した。この結果、 ^6Li の自己遮蔽効果が軽減され ^6Li の燃焼速度を早めることができたが、運転期間を通して B_4C の様な平坦な反応度に調整することができなかった。一例として、 LiAlO_2 の形状を円筒とした場合の計算結果を Fig. 2.4 に示す。同図の計算条件は、 ^6Li を天然濃縮度、燃料ブロックあたりの可燃性毒物を 3 本、 LiAlO_2 円筒の内径を 0.4 cm 一定とし、外径をパラメータ(0.5~0.8 cm)として計算した。

上記の検討結果から、 LiAlO_2 のみの可燃性毒物では初期の反応度を抑える効果が少なかったため、ホウ素を添加した場合について検討した。計算結果の一例を Fig. 2.5 に示す。この場合は、0.5 wt% のホウ素を添加し、燃料ブロックあたりの可燃性毒物を 3 本、可燃性毒物の内径を 1.8 cm、外径を 2.1 cm 一定とし、 ^6Li 濃縮度を 1~3 % に変えて計算した。この結果、運転期間を通して B_4C の実効増倍率に近づけることができたが、運転後半においては実効増倍率を 1 以上に保つことができなかった。今後は B や Li 濃縮度及び可燃性毒物の形状を変更して適切な組み合わせを見つける工夫が必要になると考えられる。

2.2 反応度係数の評価

反応度係数は、炉心設計、事故解析及び動特性解析において重要なパラメータであるが、燃焼に伴う燃料組成の変化の影響を受けるため、炉心の燃焼計算を行い反応度係数の燃焼度依存性を把握しておく必要がある。このため、本実習では、次年度に計画している反応度係数測定試験の予備検討として、MVP-BURN を用いて 前期、中期、末期の各燃焼度における反応度係数を計算した。

解析方法としては、まず、MVP-BURN による燃焼計算で各燃焼度(燃焼 0 日、330 日、440 日、660 日)における燃料組成を求めた後に各燃焼度における燃料組成に基づく入力データを作成し、燃料及び減速材の温度領域を 300~1,400K として実効増倍率を求めた。次に、燃料温度の影響を受けるドップラー係数及び減速材温度係数は、100K ごとに増減した場合の実効増倍率の変化から求めた。今回の実習では、「燃料温度及び減速材温度が同じ温度の場合」「燃料温度のみを 100K 上げた場合」「燃料温度のみを 100K 下げた場合」の 3 パターンで計算を行った。また、燃料と減速材以外の領域の温度は減速材温度に合わせるものとして計算した。解析には、HTTR の全炉心モデルを使用した。計算コードは、燃焼計算に MVP-BURN、温度係数の計算には MVP-3.0 を使用した(核データライブラリはどちらも JENDL-4.0)。制御棒位置は MVP-BURN においては燃焼期間を通して 460cm で固定し、MVP-3.0 においては燃焼期間を通して 290cm で固定して計算した。

ドップラー係数及び減速材温度係数の解析例を Fig. 2.6 及び Fig. 2.7 に示す。また、同図には CITATION コード等で計算された文献値¹⁵⁾も合わせて示す。今回の計算結果は、文献値と同様な傾向を示したものの、ばらつきが大きくなった。この原因は、ヒストリー数が 2 万と少なかったことが考えられ

る。また、今回の計算では、実習期間の制限により、領域ごとの温度設定を細分化せず、Xe や Sm の毒物の効果を考慮にいれなかったため、これらの検討を進めることによって、より文献値に近づけられる可能性があると考えられる。

3. 一次冷却系統の ^{137}Cs 沈着挙動解析

HTTR の設計事故を超える事故 (BDBA) の想定においては、燃料は溶融しないものの、一次冷却材の一部が外部に漏洩する事象が想定されている¹⁶⁾。この事象の被曝評価において、放射性セシウム (^{137}Cs) は被曝評価上極めて重要な核種であるが、事故時のソースタームは ^{137}Cs の複雑な放出・沈着挙動に伴う測定・評価の困難さから保守的な値が使用されている。このため本実習では、一次冷却系統内における核分裂生成物の沈着挙動を計算できる PLAIN コード^{17,18)}を用いて、高温ガス炉の一次冷却系統内における ^{137}Cs 沈着挙動の評価を試みた。前年度の実習¹¹⁾では、 ^{137}Cs の沈着濃度分布が文献値¹⁸⁾と大きく異なる問題が生じたため、入力データに着目して相対沈着割合の一致を目指した。モデル化した一次冷却系統の部分 (Fig. 3.1 中の点線で囲んだ範囲)、各ノードの情報¹⁸⁾及び ^{137}Cs 沈着濃度分布の計算結果をそれぞれ Fig. 3.1、Table 3.1 及び Fig. 3.2 に示す。Fig. 3.2 より、初期 ^{137}Cs 濃度が計算結果に大きく影響することが確認でき、前年度に用いた初期濃度の $1/100$ [2.3×10^{11} (n/m³)] を用いることで文献値に近い沈着分布を示すことが明らかとなった。沈着分布の差異の原因は、 ^{137}Cs の初期濃度が大きい前年度の計算の場合、一次加圧水冷却器伝熱管に沈着しきれなくなった ^{137}Cs が下流側に移行して沈着したためと考えられる。

次に、熱交換器として中間熱交換器のみの計算モデルを作成し、従来の一次加圧水冷却器のみの単独運転モデルとの比較を行った。この結果、一次加圧水冷却器と比較して伝熱部温度が高い中間熱交換器では、伝熱部の ^{137}Cs 沈着割合が小さくなることによって、一次冷却系内を循環する ^{137}Cs が増加することが明らかとなった。

4. 高温ガス炉を利用した原子力ロケットの概念検討

原子力ロケットは、原子炉の熱で推進剤を加熱する「核熱推進」、原子炉の熱で発電して推進剤を噴出させる「電気推進」、ロケットの後方で核反応させて推力を得る「パルス推進」に大別される¹⁹⁾。本実習では、高温ガス炉を利用した原子力ロケットの概念検討として、有人火星探査に必要な推進方式について検討した。

(1) 原子力ロケットの必要性

小惑星探査機「はやぶさ 2」が小惑星「リュウグウ」のサンプル採取に成功し、採取したサンプルからアミノ酸などの有機物が検出されたことは世界に大きなインパクトを与えた²⁰⁾。また、近年では、アメリカ航空宇宙局 (NASA) による有人月探査のアルテミス計画²¹⁾や有人火星探査計画等^{22,23)}が検討されて

おり、今後の宇宙探査は、今まで以上に高度な性能が求められ、探査期間も長期化していくものと考えられる。

無人探査機「はやぶさ」及び「はやぶさ 2」では、イオンエンジン²⁴⁾が採用されているが、イオンエンジンのエネルギーは太陽光発電によって賄われている。太陽光発電は、地球近傍のミッションであれば有効なエネルギー源となるが、遠方のミッションになると十分なエネルギーを供給できない。具体的には、太陽光による発電量は、太陽との距離の 2 乗に反比例するため、地球における太陽光強度を 1 とすると、火星では約 40 %、木星では約 4 %にまで減少してしまう^{19,25)}。ボイジャー 1 号及び 2 号、火星探査機キュリオシティ等にはアイソトープ電池²⁶⁾が採用されているが、発電効率が低く発電量も小さいため、ミッションに必要な機器の搭載は大きな制限を受ける。また、有人ロケットの打ち上げには化学推進ロケットが用いられているが、遠方のミッションになると燃料が膨大となることが懸念されている。このため、太陽からの距離に影響を受けずに高い推力や電力を供給できる原子力ロケットが不可欠となっている。推進方式と推力等の関係²⁷⁾を Fig. 4.1 に示す。

(2) 核熱推進

核熱推進は、原子炉で発生した熱で液体水素などの推進剤を加熱・膨張させてノズルから噴出して推進力を得る推進方法で、実用化が近いとされている。核熱推進は、従来の化学推進ロケットと比較して 2～10 倍²⁸⁾の比推力²⁴⁾(推進剤の消費率あたりの推力を表す燃費と似たようなもので、比推力が大きいほど重量効率が高い)があり、惑星間航行の推進方法に適しているとして 1950～1960 年代にかけて研究され、基本的な技術は確立されている²⁹⁻³¹⁾。当時の核熱推進の研究は、ミッションが地球近傍であったため重量と経済性の観点から化学推進ロケットと太陽光発電が採用されたこと、米国がソ連との宇宙開発競争において月面着陸したことで決着がついたことで下火となった。しかし、近年の有人火星探査の関心の高まりから再び研究が活発化している。この理由は以下の通りである³²⁾。

- 1) 核熱推進の持続時間は化学推進ロケットよりも長いこと、火星までの移動時間を 20～25% 短縮できる(移動時間の短縮は、宇宙飛行士が航行中に宇宙放射線から受ける線量を減らすために重要)。
- 2) 推力が高ければ、火星へのミッションに利用できる打上げ期間を長くとれる(従来の化学推進ロケットの打上げ期間は、惑星の相対的な位置関係により 26 ヶ月ごとに 30 日間であるが、核熱推進であれば多くのコースを選択できるため打上げ期間を長くできる)。
- 3) 核熱推進であれば、火星へのミッションがトラブルで中止となっても宇宙飛行士が安全に地球に帰還できる(化学推進ロケットであれば、推進剤の枯渇に備えて事前に推進剤を火星に送っておく必要性が高いために、ミッション失敗時のリスクが高くなる)。

以上の様な経緯のもと、1960 年代に基本的な技術が確立された核熱推進は、近年の核燃料製造技術の進歩もあり実証段階に近づいている³³⁻³⁶⁾。しかし、推進剤となる水素が枯渇すると航行不能となること、重量制限から多量の推進剤を搭載するには探査機器を減らす必要があること等の課題がある。

(3) 電気推進

電気推進は、Fig. 4.1 に示す様に加速機構の違いにより、静電場でイオンを加速噴出させる静電方式、ローレンツ力でプラズマを加速噴出させる電磁方式、ジュール加熱で高温高圧プラズマガスを生成し噴き出す熱電方式に大別され、それぞれカバーできる比推力・推力領域が異なる³⁷⁾。電気推進の特徴は、化学推進に比べて推進剤噴出速度が大きいために比推力が 500～10,000 秒と化学推進の比推力(100～300 秒程度)に比べて高い。このため、化学推進に比べて推力が小さい代わりに効率が良く、長時間をかけて加速する無人探査ミッションには最適な推進方式である。また、化学推進はヒドラジンなど化学推進剤自身がもつ内部エネルギーを燃焼発熱反応により利用する内燃機関と考えられるが、電気推進はエネルギーを外部から供給する外燃機関であり、その作動領域が広い特徴がある³⁷⁾。しかし、電気を必要とするために探査機に発電機能を付加する必要があるとともに、ガス状などの推進剤が枯渇すると航行不能となるため、これらのリスク管理が課題となる。

(4) パルス推進

パルス推進は、宇宙船外で核反応させて推進する方式であり、原子炉が不要であり比推力(～10,000 秒)が高い特徴がある³⁸⁾。しかし、地上での実験が困難なこともあり、実用化は見通せてない。その他のパルス推進方式として、レーザー核融合と電気推進を組み合わせた推進方法も提案されている^{38,39)}。また、高温ガス炉を採用し、電気レーザー換は MHD(電磁流体)方式を、推力発生にはレーザー核融合ロケットで採用されている磁気ノズルを採用し、レーザーによりペレット(推進材・プラスチック小球)をプラズマ化して磁場により一方向に放出し推力を得る方式(核融合反応でないため遮蔽を減らせるメリットがある)等も研究されている³⁹⁾。

(5) 有人火星探査に必要な推進方式についての検討

現在、最も実用化に近い核熱推進は、被覆燃料粒子^{35,36)}を利用し、推進剤となる高温の水素ガスで冷却されている原子炉と見ることができるため、一種の高温ガス炉と見なすことができる。しかし、有人火星探査では、より長期のミッションとなることから、核熱推進より比推力が高い電気推進を選択した方が有利と考えられる。また、電気推進は、発電機によって推進に必要な電力を供給するとともに、宇宙船に必要なその他の電力も供給できることから有利である。このため、発電用原子炉の選定、発電方法の選定、電気推進方式の選定について検討した。なお、今回の実習では、核熱推進と同程度の推力を目標として検討した(Fig. 4.1 の「Target」)。

1) 発電用原子炉の選定

これまで、宇宙用原子炉としては、液体金属冷却炉やガス冷却炉等が研究されている²⁹⁻³¹⁾。原子炉の基本的な構造は地上の原子炉と大きな違いはないが、地上と宇宙環境における大きな相違点は排熱の処理である。宇宙環境では、排熱をラジエータ(放射板)からの輻射によって行われる必要がある。ラジエータからの輻射は、Stefan-Boltzman の法則により放射温度の 4 乗及び輻射面積に比例する。このため、ラジエータの面積、すなわち重量を抑えるという観点では、炉心の動作温度をできるだけ高くすることが望ましい。また、冷却材の動作圧力が低いほど、圧力容器や配管の厚みを小さくできるため、システム全体を小型化・軽量化できる。さらに、冷却材が相変化を起こす可能性

がある場合、相変化による体積の変化や無重量空間や低重力環境での挙動を考慮する必要があるため、相変化が生じない冷却材が望ましい。以上のことから、運転温度が 600～1,200 °C と高く、この温度範囲で冷却材の相変化が生じないヘリウムガス冷却による高温ガス炉が適していると考えられる。

2) 発電方法の選定

宇宙炉に用いられる主な発電方式としては、熱電変換素子、スターリングエンジン、ガスタービン発電がある²⁹⁻³¹⁾。熱電変換素子は、原子力電池としてすでに多くの探査機に搭載されており実用性が高く軽量であるが、発電効率が 5～10% と低く、発電量も 1kW が限界である。スターリングエンジン⁴⁰⁾は、密閉空間内の空気を 2 つのピストンに位相差をつけて動かし、エンジン内部の圧力を増減させることで熱エネルギーを仕事エネルギーに変換する外燃機関であり、KRUSTY 等の月面用原子炉の発電機として検討されている^{31,41)}。スターリングエンジンは、熱電変換素子より効率が高く、発電量も大きいですが、kW 級の電力しか供給することができない。このため、重い MW 級の電力を供給でき、発電効率が 30～50% と高いガスタービン発電が適していると考えられる。

3) 電気推進方式の選定

今回の実習の性能目標では、Fig. 4.1 に示す様に電気推進の中でも電磁方式が適していると考えられる。しかし、これまでの推進方法の共通の課題として、推進剤が枯渇した際の問題がある。推進剤の枯渇は、機器の故障や小物体衝突等によるタンクのリーク等によって、想定外に発生する恐れもあるだろう。これらの問題を解決するために、航路に沿った箇所に事前に補給用の推進剤を設置することも考えられるが、コストやリスク低減の観点からも、有効な手段とは考えにくい。このため、航行中に推進剤を補給できる推進方法があれば、これらの問題を解決できる手段になりえる可能性がある。

航行中に推進剤を補給できる推進方法として、電磁飛翔体加速装置⁴²⁾を用いた方法が考えられる。この方法は、電導性の高い 2 本のレールの間に電機子及び飛翔体を置き、レールに流す電流と磁場によるローレンツ力によって高速で飛翔体を射出させるものである。飛翔体は、地球近傍小惑星、月、火星等で採取できる岩石等を用いることができるため、緊急時等の推進剤補給が可能となる。

上記の考察をもとにした高温ガス炉を利用した原子力ロケットの概念を Fig. 4.2 に示す。今後は、数十 MW 規模の電力を供給できる高温ガス炉とガスタービン発電システム、15 kg 程度の飛翔体を数 km/s で射出するための電磁飛翔体加速装置、これに必要な放熱板や容器、パイプ等の軽量化に関する検討も併せて進め、実現性のある原子力ロケットの成立性を検討したい。なお、成立性の目安としては、宇宙船の総重量を国際宇宙ステーションの重量約 420 t⁴³⁾(宇宙空間で建設を経験している最大の建造物)より軽量となる「約 250 t」、到達速度を「600 日以内に 3.3 km/s」と考えている。

5. 夏期休暇実習のアンケート結果

本実習の改善を目的としてアンケート調査を実施した。アンケートは、以下の 6 つの質問に関する回答として、「はい」、「まあまあ」、「いいえ」の中から選択するものとし、実習生全員から回答を得た。アンケートの結果を Fig. 5.1 に示す。

- Q1) 実習内容に興味がもてましたか？
- Q2) 実習は役に立ちましたか？
- Q3) 施設見学等は良かったですか？
- Q4) JAEA の業務の理解に役立ちましたか？
- Q5) 寮等での生活は快適でしたか？
- Q6) 本実習は、友人や後輩等に推薦する価値がありますか？

実習の内容に関する Q1)、Q2)、Q6) に関しては、すべての実習生が高く評価した結果となった。施設見学 Q3) に関しては、見学時間を制限せずに見学したこともあり、全員から高い評価を得た。JAEA の業務の理解 Q4) に関しては、すべての実習生から高い評価を得ており、本実習の主目的である「夏期休暇期間を活用した原子力機構での就業体験」は問題なく達成できたものと考えられる。また、寮等での生活 Q5) に関しては、昨年と同様に寮の施設や老朽化によるものと考えられる不満が見られた。また、宿泊関係等の諸費用についてもサポートして欲しい旨の意見があった。

実習生からの主な感想等を下記に列挙する。これらの感想や意見を踏まえて、来年度はより良い夏期休暇実習を体験できるようにしたい。

- ・昨年参加した夏期休暇実習の受入れ部署よりも担当者や同課の職員とのコミュニケーションをとる機会が多かったので、とても充実した実習になった。
- ・実際の原子炉を見ることで実習のイメージが掴みやすくなって良かった。
- ・最後の 2 日間が急遽オンライン実習となったが、柔軟に対応してくださり、ありがたかった。
- ・国際会館の部屋の設備が古いので、もう少し生活しやすい環境にして欲しい。
- ・桜道寮とは異なり、国際会館では朝食がなかったので、平日は 1 日 2 食摂れると良いと思った。
- ・宿泊関係の費用も出して欲しい。
- ・国際会館の自室の冷蔵庫を無料で使いたい。
- ・実習は、担当者がとても親切にしてくださったので、過ごしやすく、とても勉強になりました。
- ・国際会館の食事に関して、白米は自分で取り分ける方式だったのですが、どの程度の量まで自分の茶碗に盛って良いのか、分からなかった。
- ・今回の実習期間は 1 週間という短い期間であったが、本実習に参加するならば、できる限り 8 日～10 日あった方が良いと思った。
- ・短い期間でしたが、手厚い指導を頂けたことや当課の業務について色々教えてくださったことは、とても貴重な経験だった。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、大洗原子力工学研究所 高温工学試験研究炉部 堀 直彦次長に貴重なご意見を頂いた。以上、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Nishihara, T., Yan, X., Tachibana, Y., Shibata, T., Ohashi, H., Kubo, S., Inaba, Y., Nakagawa, S., Goto, M., Ueta, S., Hirota, N., Inagaki, Y., Iigaki, K., Hamamoto, S. and Kunitomi, K., Excellent Feature of Japanese HTGR Technologies, JAEA-Technology 2018-004, 2018, 182p.
- 2) 田中隆則, 小型モジュール炉 (SMR) を巡る国際動向とそのインパクト, 日本原子力学会誌 ATOMO Σ, Vol.60, No.7, 2018, pp.382-386.
- 3) OECD/NEA, The NEA Small Modular Reactor Dashboard, No. 7650, 2023, 73p.
- 4) OECD/NEA, The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Volume II, No. 7657, 2023, 61p.
- 5) 日本原子力研究開発機構, ATOMICA, 原子力電池 (アイソトープ電池), 2020, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_08-04-02-08.html, (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 6) 石塚悦男, 松中一朗, 石田大樹, Hai Quan HO, 石井俊晃, 濱本真平, 高松邦吉, Kenzhina, I., Chikhray, Y., 近藤 篤, 高木直行, 藤本 望, 2018 年度夏期休暇実習報告; HTTR 炉心を用いた原子力電池に関する予備的検討 -核設計のための予備検討-, JAEA-Technology 2019-008, 2019, 12p.
- 7) 石塚悦男, 中島弘貴, 中川直樹, Hai Quan HO, 石井俊晃, 濱本真平, 高松邦吉, Kenzhina, I., Chikhray, Y., 松浦秀明, 藤本 望, 2019 年度夏期休暇実習報告; HTTR 炉心を用いた原子力電池に関する予備的検討 -核設計のための予備検討 (2)-, JAEA-Technology 2020-008, 2020, 16p.
- 8) 石塚悦男, 満井 渡, 山本雄大, 中川恭一, Hai Quan HO, 石井俊晃, 濱本真平, 長住 達, 高松邦吉, Kenzhina, I., Chikhray, Y., 松浦秀明, 藤本 望, 2020 年度夏期休暇実習報告; HTTR 炉心を用いた原子力電池に関する予備的検討 -核設計のための予備検討 (3)-, JAEA-Technology 2021-016, 2021, 16p.
- 9) 五十川浩希, 直井基将, 山崎誠司, Hai Quan HO, 片山一成, 松浦秀明, 藤本 望, 石塚悦男, HTTR の核的パラメータの計算 -2021 年度夏期休暇実習報告-, JAEA-Technology 2022-015, 2022, 18p.
- 10) 石塚悦男, Hai Quan HO, 北川堪大, 福田理仁, 伊藤 諒, 根本将矢, 楠木捷斗, 野村拓朗, 長瀬颯太, 橋本温希, 中野優美, 石井俊晃, 長住 達, 飯垣和彦, 2022 年度夏期休暇実習報告, JAEA-Technology 2023-013, 2023, 19p.
- 11) 石塚悦男, 長住 達, 長谷川俊成, 川井大海, 脇坂真司, 長瀬颯太, 中村建斗, 矢口陽樹, 石井俊晃, 中野優美, 飯垣和彦, 2023 年度夏期休暇実習報告, JAEA-Technology 2024-008, 2024, 23p.

- 12) Matsuura, H., Kouchi, S., Nakaya, H., Yasumoto, T., Nakao, Y., Shimakawa, S., Goto, M., Nakagawa, S., Nishikawa, M., Performance of High-Temperature Gas-Cooled Reactor as a Tritium Production Device for Fusion Reactors, Nucl. Eng. Des., 243, 2012, pp.95-101.
- 13) Goto, M., Okumura, K., Nakagawa, S., Inaba, Y., Matsuura, H., Nakaya, H., Katayama, K., Nuclear and Thermal Feasibility of Lithium-Loaded High Temperature Gas Cooled Reactor for Tritium Production for Fusion Reactors, Fusion Eng. Des., 136, 2018, pp.357-361.
- 14) IAEA Nuclear Data Section. Isotope Browser app, Ver. 3.34.73. IAEA; 2020.
- 15) 山下清信, 新藤隆一, 村田 勲, 中川繁昭, 中田哲夫, 徳原一実, 高温工学試験研究炉の反応度係数の評価, JAERI-M 90-008, 1990, 49p.
- 16) 大洗研究所(北地区)原子炉設置変更許可申請書[HTTR(高温工学試験研究炉)原子炉施設の変更]の本文及び添付書類の一部補正について 添付書類十, <https://www.nra.go.jp/data/000299237.pdf> (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 17) 馬場 治, 露崎典平, 沢 和弘, 高温ガス炉における FP 沈着解析コード; PLAIN, JAERI-M 88-266, 1989, 60p.
- 18) 沢 和弘, 村田 勲, 新藤隆一, 塩沢周策, 高温工学試験研究炉の遮蔽設計における核分裂生成物線源評価, JAERI-M 91-198, 1991, 58p.
- 19) 西山貴章, 原子力電気推進システムにおける宇宙用原子炉の提案, 九州大学工学部エネルギー科学科 卒業論文, <http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/publications/2008/Bnishiyama.pdf> (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 20) 小惑星探査機「はやぶさ 2」初期分析 可溶性有機物分析チーム, 研究成果の科学誌「Science」論文掲載について, https://www.jaxa.jp/press/2023/02/20230224-1_j.html (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 21) NHK NEWS WEB, 日本人宇宙飛行士の月面着陸盛り込んだ取り決め 日米間で署名, <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20240411/k10014418401000.html> (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 22) 宇宙航空研究開発機構, 有人火星探査の実現のために, https://www.jaxa.jp/article/special/lunar/mendell_j.html (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 23) 宇宙航空研究開発機構, 火星衛星探査計画, https://www.mext.go.jp/kaigisiryō/content/20210915-mxt_uchukai01-000017876_2.pdf (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 24) 國中 均, 電気推進・イオンエンジン, ISAS ニュース 2000.5 No.230, <https://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.230/ken-kyu.html> (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 25) 永田英隆, 宇宙探査機用小型原子炉の検討, 九州大学大学院 総合理工学府 修士論文, <http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/publications/2008/Mnagata.pdf> (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 26) 火星探査車「キュリオシティ」キュリオシティの電源と熱制御, <https://spacenuclear.jp/spacecrafts/msl3.html> (参照 2024 年 10 月 25 日).
- 27) Ebersohn, F., Longmier, B., Sheehan, J., Shebalin, J., Girimaji, S., Preliminary Magnetohydrodynamic Simulations of Magnetic Nozzles, The 33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, USA October 6-10, 2013, IEPC-2013-334, <https://pepl.engin.umich.edu/pdf/IEPC-2013-334.pdf> (参照:2024 年 10 月 25 日).

- 28) 九州大学大学院 総合理工学府 総合理工学専攻 先進宇宙ロケット工学研究室、推進システム性能の比較、<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/LFR/No-4.htm> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 29) 西山 潤，宇宙探査のための原子力，日本原子力学会「創立 60 周年シンポジウム」-震災をこえて 原子力の明日-，2019 年 4 月 25 日，<https://www.aesj.net/document/nishiyama.pdf> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 30) 安田秀志，滝塚貴和，米国及び旧ソ連の原子力ロケット，JAERI-Review 96-015，1996，37p.
- 31) Poston, D., Gibson, M., Godfroy, T., McClure, P., KRUSTY Reactor Design, Nuclear Technology, Vol 206, 2020, pp.S13-S30.
- 32) Burns, D., Johnson, S., Nuclear Thermal Propulsion Reactor Materials, DOI: 10.5772/intechopen.91016, <https://www.intechopen.com/chapters/71396> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 33) 原子力産業新聞，米 NASA と DARPA 宇宙探査用原子力ロケット・エンジン実証へ，2023 年 1 月 27 日，<https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/16303.html> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 34) UchuBiz, DARPA と NASA、核熱ロケット開発企業を選定-2027 年までに試験、火星有人を想定，<https://uchubiz.com/article/new23697/> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 35) 原子力産業新聞，米 NASA 核熱推進エンジン開発で USNC 社と契約，2023 年 10 月 23 日，<https://www.jaif.or.jp/journal/oversea/20095.html> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 36) Ultra Safe Nuclear Corporation, TRISO/FCM fuel, <https://www.usnc.com/fuel/> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 37) 田原弘一，電気推進ロケットエンジン開発研究の現状と今後の展開，応用物理，第 81 巻，第 3 号，2012，pp.196-203.
- 38) 中島秀紀，原子力ロケットの現状と未来，<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/LFR/papers/AtomicEnergySocietyJapan2014.pdf> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 39) 中島秀紀，永田英隆，三好 誠，小谷優介，山本直嗣，梶村好宏，原子力電気推進システムの提案，<https://jaxa.repo.nii.ac.jp/record/5593/files/63739011.pdf> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 40) 日本スターリングエンジン普及協会，スターリングエンジンとは，<http://www.eco-stirling.com/about-se.html> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 41) Gibson, M., Poston, D., McClure, P., Godfroy, T., Briggs, M., Sanzi, J., Kilopower reactor using stirling technology (KRUSTY) Nuclear ground test results and lessons learned, NASA/TM-2018-219941, 2018, 13p.
- 42) 矢守 章，電磁飛翔体加速装置開発の歩み-(I)，宇宙化学研究所報告，第 117 号，2001，pp.1-36，<https://www.kenkai.jaxa.jp/library/radio/pdf/kenkyu117.pdf> (参照 2024 年 10 月 25 日)。
- 43) JAXA 有人宇宙技術部門，用語集，国際宇宙ステーションの仕様，<https://humans-in-space.jaxa.jp/glossary/detail/000405.html> (参照 2024 年 10 月 25 日)。

Table 1.1 Participants of summer holiday practical training for HTTR from 2017

Year	Affiliation	Number of participants	Total
2017	National Institute of Technology, Sendai College	1	3
	Kyushu University	1	
	Tokyo City University	1	
2018	Nagaoka University of Technology	1	4
	Tokyo City University	1	
	Kyushu University	1	
	Hokkaido University	1	
2019	Kyushu University	3	4
	Hokkaido University	1	
2020	Kyushu University	4	4
2021	Kyushu University	3	4
	Hokkaido University	1	
2022	Kyushu University	3	8
	Hokkaido University	2	
	Kyoto University	1	
	Tokyo City University	1	
	Tokai University	1	
	Kyushu University	2	
2023	Hokkaido University	2	5
	Tokyo City University	1	
	Kyushu University	2	
2024	Hokkaido University	1	4
	Tokyo City University	1	
	Kyushu University	2	

Table 1.2 Summer holiday practical training for HTTR on 2024

Participants	Period	Practice themes	Related chapters
Keiichiro EGASHIRA	26 Aug.– 6 Spt.	HTTR core analysis	2.1
Aoi FURUYA	9–13 Spt.	Impact of changing burnable poison	
Ryota ANDO	2–13 Spt.	Analysis of ^{137}Cs deposition behavior in primary cooling system	3.
Akira SAKAGUCHI	26 Aug.– 6 Spt.	HTTR core analysis	2.2
		Evaluation of reactivity coefficients	4.
		Feasibility study of nuclear rocket using HTGR	

Table 3.1 Nodes information for PLAIN code

Node No.	Node name	Inlet temperature (C)		Flow rate (kg/s)
		Coolant	Wall	
1	Inner side of double pipe in RPV (1)	850	850	12.4
2	Inner side of double pipe in RPV (2)	850	850	12.4
3	Inner side of double pipe (outside of RPV)	850	850	12.4
4	Inner side of double pipe (PPWC side)	850	850	12.6
5	Heat transfer part of PPWC	850	160	12.6
6	PPWC plenum	850	160	12.6
7	PGC pipe (PPWC side)	384	384	4.19
8	PPWC filter (casing)	384	386	4.19
9	PPWC filter	384	386	5.69×10^{-10}
10	PPWC circulator	384	386	4.19
11	PPWC pipe (PGC side)	395	395	4.19
12	PPWC outer body	395	386	12.6
13	Outer side of double pipe (PPWC side)	395	395	12.6
14	Outer side of double pipe (RPV side)	395	395	12.6
15	Outside of core	400	400	6.22
16	Upper shield	420	450	0.0131

RPV : Reactor Pressure Vessel

PPWC : Primary Pressurized Water Cooler

PGC : Primary Gas Circulator

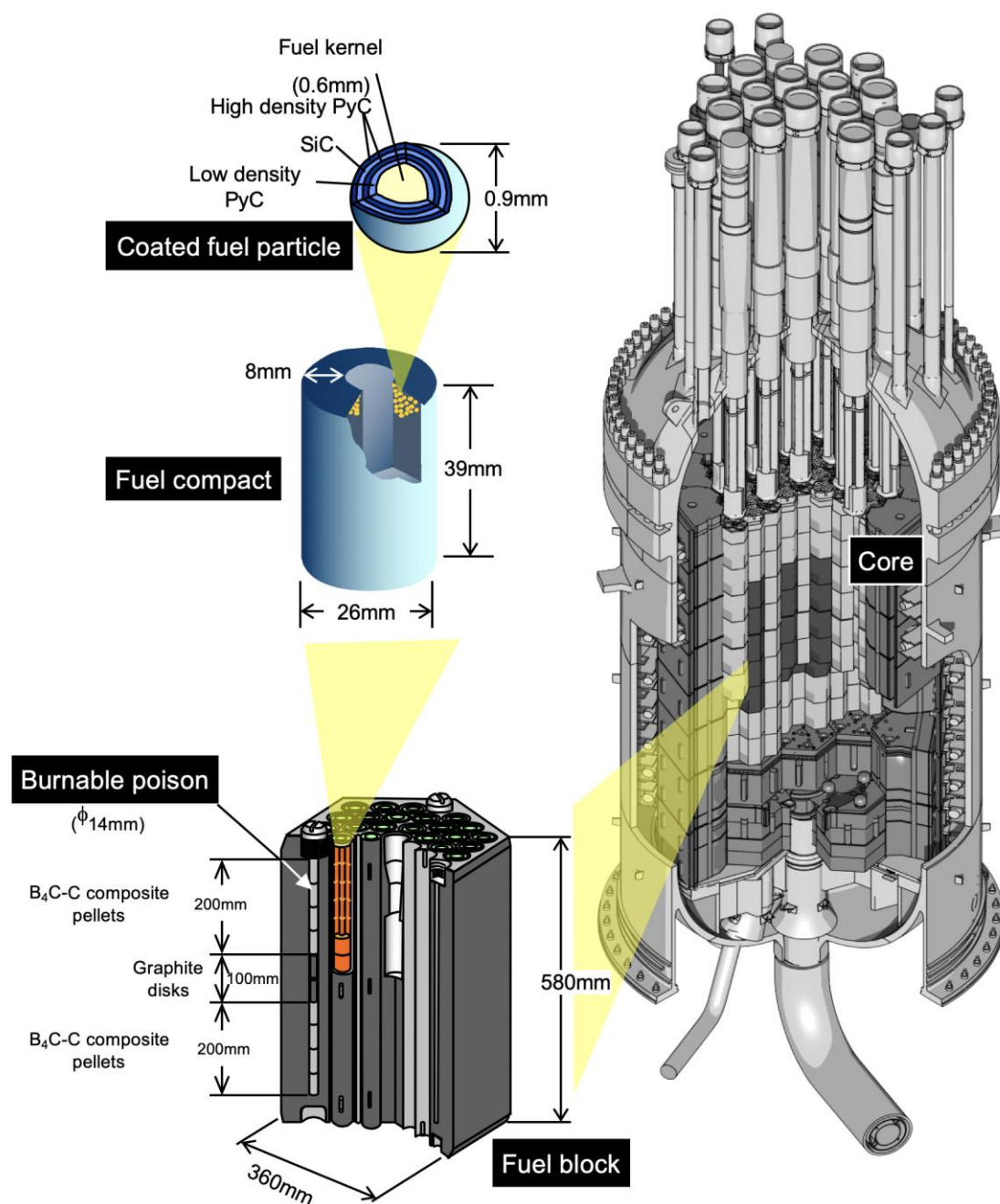


Fig. 2.1 Outline of HTTR core

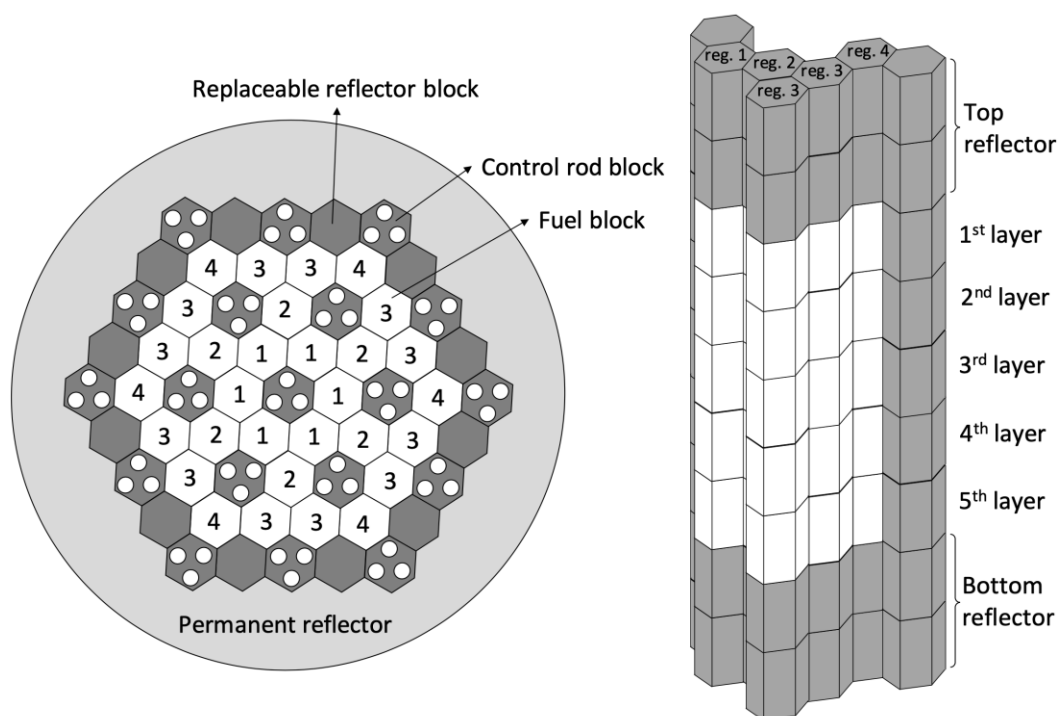


Fig. 2.2 HTTR core layout

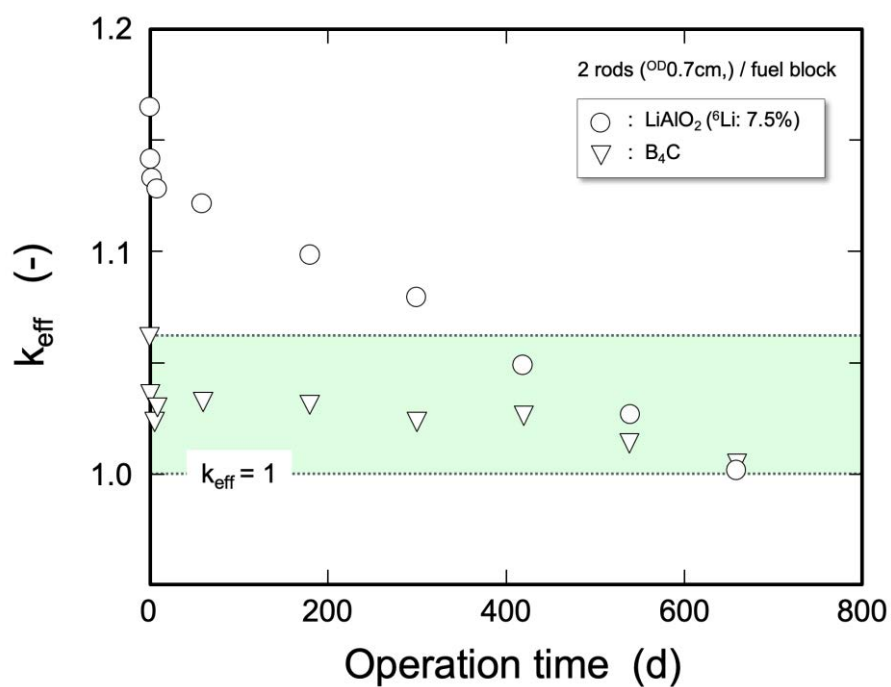


Fig. 2.3 Effect of burnable poison replaced by LiAlO_2

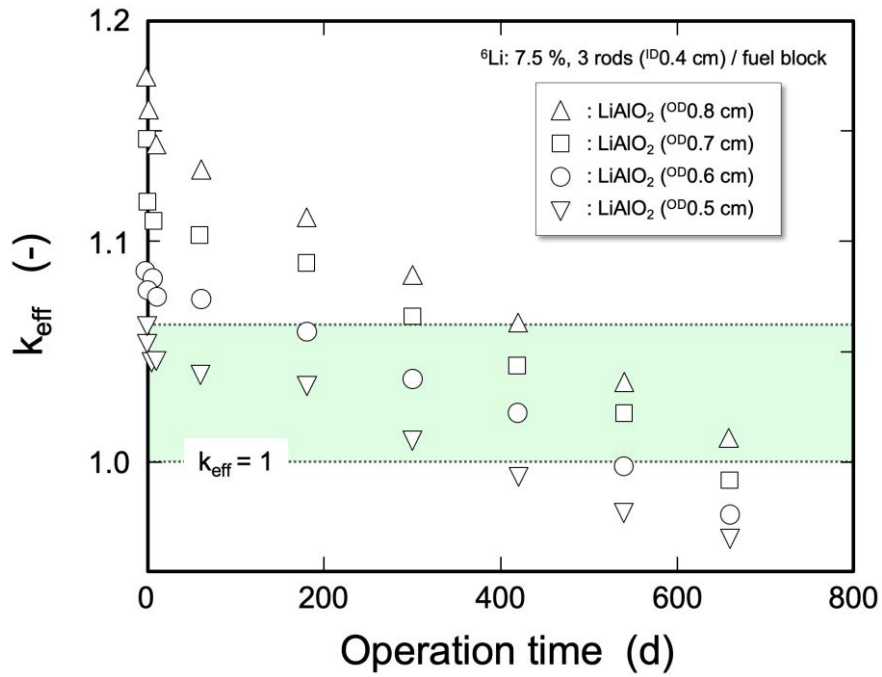


Fig. 2.4 Effect of outer diameter change for LiAlO_2 burnable poison

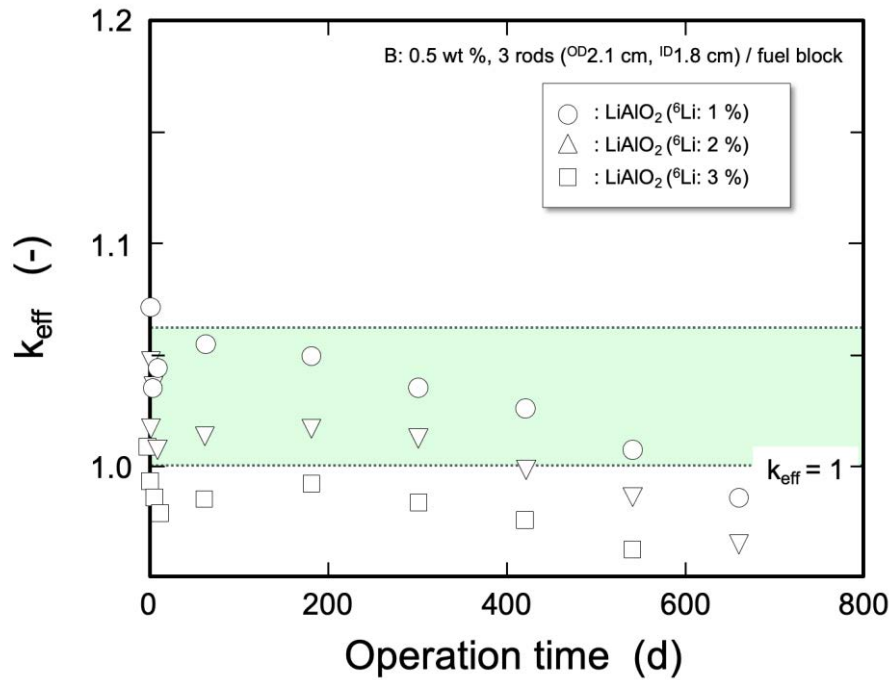


Fig. 2.5 Effect of ^6Li concentration change for LiAlO_2 burnable poison

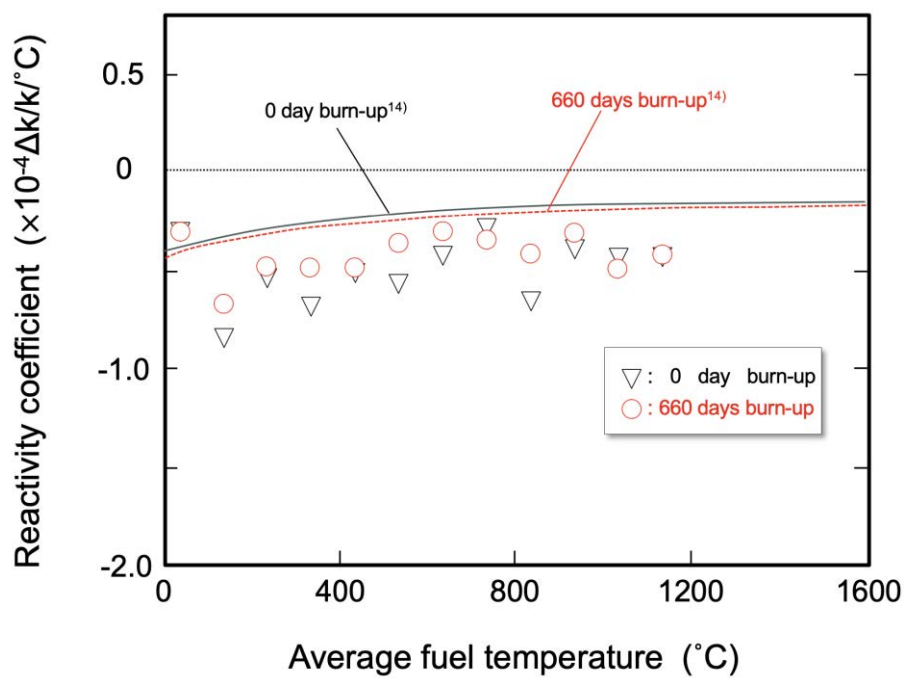


Fig. 2.6 Doppler coefficients

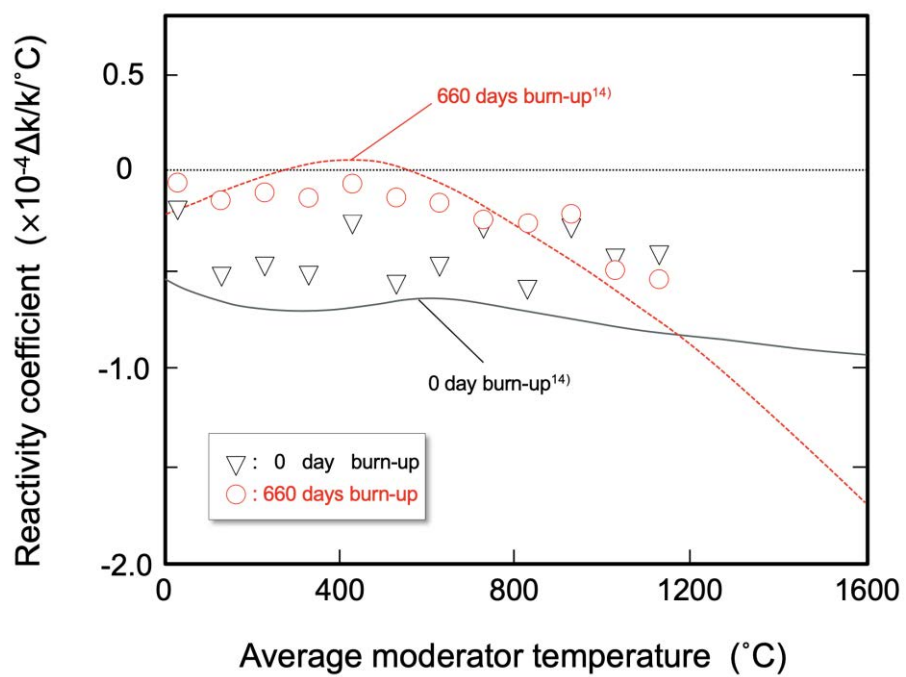
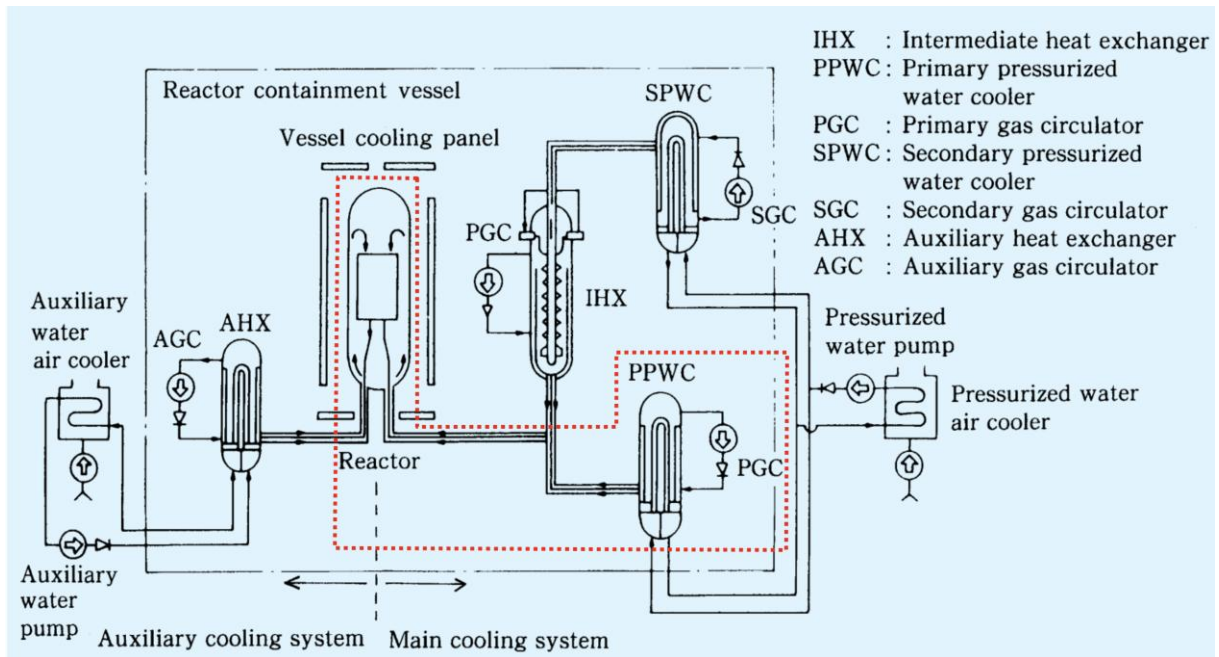


Fig. 2.7 Moderator temperature coefficients



(From Fig.3.1.12 of JAEA-Technology 2018-004¹⁾)

Fig. 3.1 Part of the primary cooling system for calculation model

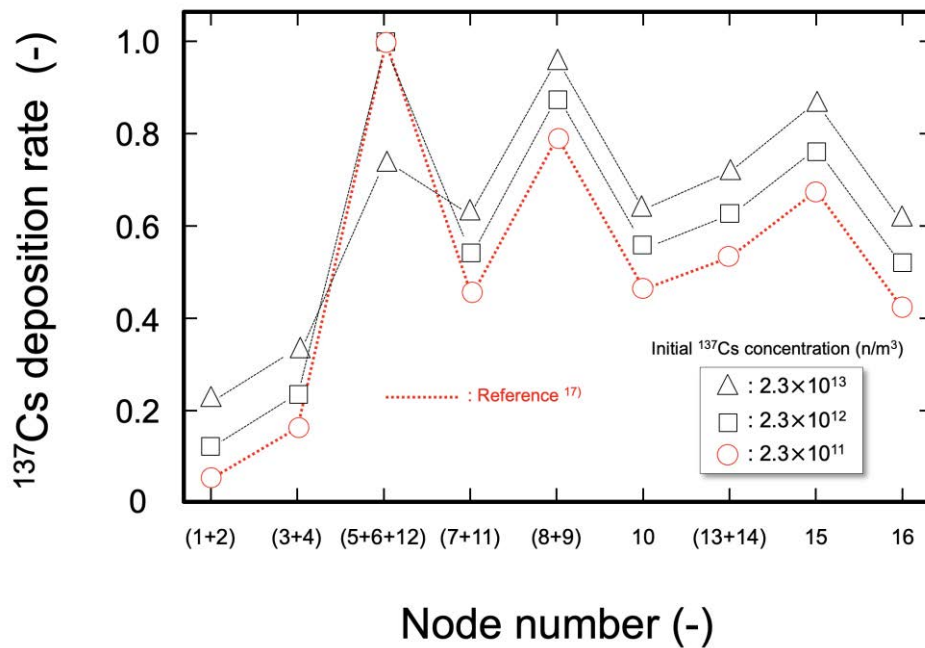


Fig. 3.2 Distribution of ^{137}Cs deposition rate

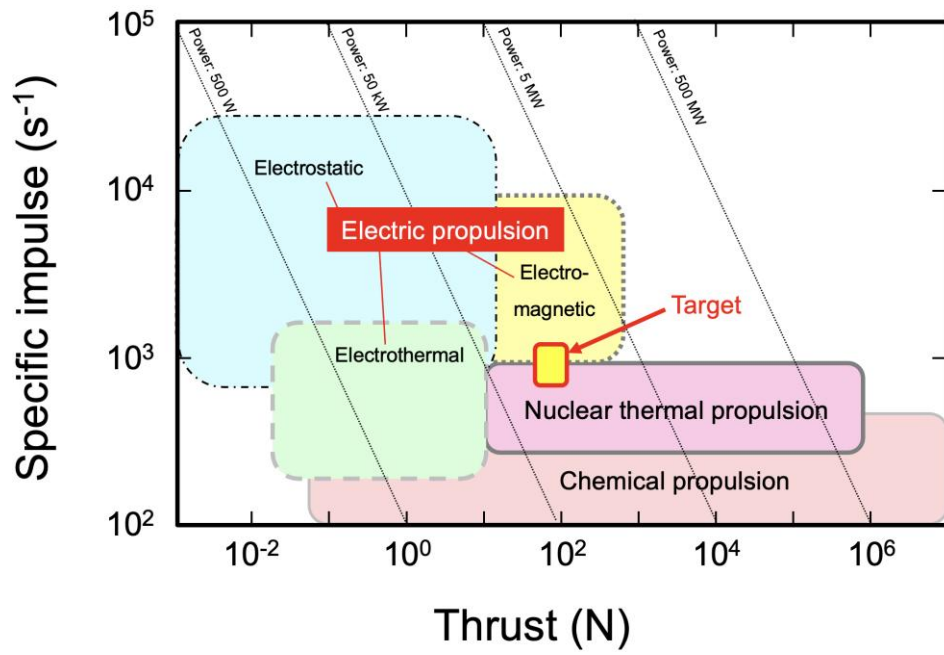


Fig. 4.1 Specific impulse and thrust for propulsion method

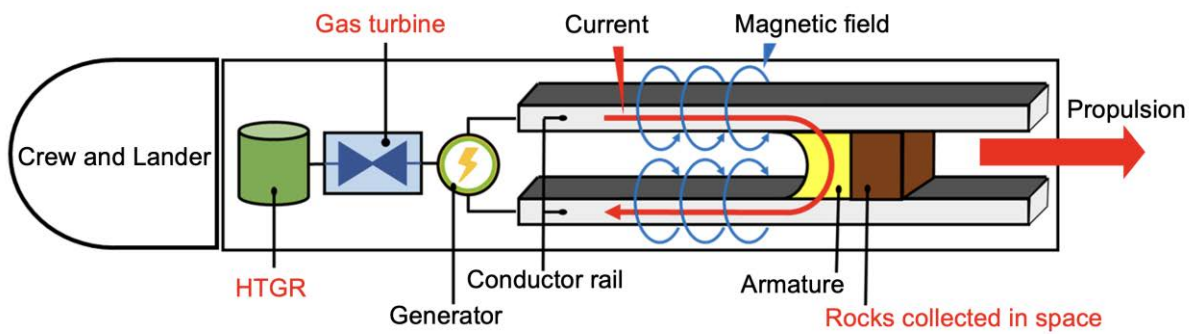


Fig. 4.2 Conceptual image of a nuclear rocket using HTGR

Q1) 実習内容に興味がもてましたか？

	はい	まあまあ	いいえ
合計	4	0	0
A	1		
B	1		
C	1		
D	1		

←該当箇所に「1」を入力

Q4) JAEAの業務の理解に役立ちましたか？

	はい	まあまあ	いいえ
合計	4	0	0
A	1		
B	1		
C	1		
D	1		

←該当箇所に「1」を入力

Q2) 実習は役に立ちましたか？

	はい	まあまあ	いいえ
合計	4	0	0
A	1		
B	1		
C	1		
D	1		

←該当箇所に「1」を入力

Q5) 寮等での生活は快適でしたか？

	はい	まあまあ	いいえ
合計	0	4	0
A		1	
B		1	
C		1	
D		1	

←該当箇所に「1」を入力

Q3) 施設見学等は良かったですか？

	はい	まあまあ	いいえ
合計	4	0	0
A	1		
B	1		
C	1		
D	1		

←該当箇所に「1」を入力

Q6) 本実習は、友人や後輩等に推薦する価値がありますか？

	はい	まあまあ	いいえ
合計	4	0	0
A	1		
B	1		
C	1		
D	1		

←該当箇所に「1」を入力

Fig. 5.1 Results of questionnaire

