

第52回 原子力学会賞受賞記念寄稿

先進次世代原子炉の多角的研究

東京工業大学 小原 徹

1. はじめに

部会の編集委員会から、昨年度標記題目で学会よりいただいた学術業績賞の記念寄稿を依頼されました。皆様のお役に立つかはなはだ心もとないのですが、研究の概略と考え方について述べたいと思います。なお、私は臨界安全に関係した研究も行っていますが、今回は原子炉概念研究に関することだけ述べようと思います。

この研究はある特定の炉型について実用化に向けた開発を行うことを目的としたものではなく、さまざまな炉型を考慮した上で将来発展が期待される炉型を研究対象に選び、それぞれの炉型の得失を見極めた上でその可能性を明らかにすることを目的としています。大風呂敷に言えば、核分裂連鎖反応を基本原理とする原子炉は何がどこまでできるのかその限界を明らかにしようというものです。このため個々の技術的問題の解決よりも、そもそも何が原理的に成り立つかを追及することに重点を置くという考え方で行っています。研究対象とした炉型は、高温ガス炉、液体金属冷却高速炉で、さらに研究炉や核励起レーザーによる核分裂エネルギーの直接変換についても研究対象としました。その概要を順にご説明したいと思います。ただし今回述べる内容は、研究すべてを完全に網羅したわけではなく一部を割愛しています。またここでは定性的に大雑把に記述しますので、それぞれの解析の結果や得られた知見の詳細は最後に載せました文献を参照していただければと思います。

2. 高温ガス炉

ご承知のとおり高温ガス炉は、プリズム型とペブルベッド型が開発されてきました。ペブルベッド型は、運転中にペブル燃料を炉心上部から少しずつ装荷し、燃焼した燃料を下部から少しずつとりだします。余剰反応度がほとんどないため運転中の反応度事故の懸念がなく、中性子経済がよくなることが期待できるので、魅力的な特徴を持っています。一方燃料交換機構が複雑となり、機器や燃料要素の破損や故障時の対応が難しいという面も持っています。この問題に対し、Teuhert(1)がPeu a Peuという円筒形のキャビティー上部から燃焼に伴いペブル燃料を少しずつ装荷し、下部の排出寄稿を持たない炉心(図1)を提唱していたので、この炉心の燃焼特性について調べました。通常のペブルベッド炉では、燃料要素が上から下へ移動し、炉心内の燃焼領域はほとんど動きませんが、この炉心では、運転にともない上部に燃料を足していくので燃焼領域が徐々に上に移動していきます。さらに直接処分する際の使用済み燃料を安定性のメリットを考え、JAEAで研究・開発された岩石型燃料を用いた場合の燃焼特性についても検討しました。

結果としては、上部空洞による中性子の漏れはあるものの装荷燃料の濃縮度を適切に設定すれば、被覆燃料粒子の限度まで燃焼度をあげることは可能であることがわかりました。燃焼度が高くなれば同じエネルギー発生に対し使用済み燃料の量が減るので、最終地層処分に有利になることが期待できます。

プリズム型炉心を長期間運転するには、余剰反応度の抑制が必要ですが、組成・大きさを変えた複数の可燃性毒物粒子を用いることで、長い運転期間中に余剰反応度をほとんど0にすることができることがわかりました。可燃性毒物を持ちいることは中性子経済上不利に働きますが、ペブルベッド炉のような運転中に燃料を移動させる必要がないプリズム型でも反応度の平坦化が可能であることがわかりました。

また、高温ガス炉は受動安全性能に優れますが、特に崩壊熱が受動的除去ができる条件を明らかにしようと、プリズム型炉、ペブルベッド型炉の両方に対して、崩壊熱除去が可能な運転出力、炉心サイズ、建屋のサイズ等についての条件を、原子建屋を地上に設置した場合と地下に設置した場合について検討をしました。高温ガス炉の受動的崩壊熱除去では、空気による自然対流による除熱を利用するのが一般的ですが、ここでは極限状態として対流は期待せず、熱伝導と放射だけでの除熱を考えて検討を行い、どのようなパラメーターが除熱効果に影響を与えるかを明らかにしました。

高温ガス炉では、高い燃焼度が期待できそのために必要な反応度制御も十分可能です。また崩壊熱除去を受動的機能のみで行う設計も可能です。岩石型燃料を使用することで使用済み燃料の直接地層処分時の安定性も期待できます。ただし、熱炉ですので小型の炉心で高い燃焼度を達成するためには装荷燃料の濃縮度を高くする必要があり、また炉心の出力密度が低いので必然的に炉心が大きくなることに留意する必要があります。

3. 研究炉・核励起レーザー

研究炉については、シリコンドーピングによる大口径半導体製造のニーズが高まる一方、燃料の供給に不安要素があると考え、PWR用燃料集合体をつかった研究炉が成立しないか検討を行いました。炉心部分を軽水冷却とし黒鉛反射体で炉心を覆うデザインを検討してみたところ、9体のPWR燃料集合体と厚さ60 cm程度の黒鉛反射体で、直径30 cm程度のシリコンを複数体同時に照射できる炉心が十分成立することがわかりました。PWR燃料集合体は短尺のものと、発電用に使われているものと同じサイズのもののどちらでも成立しました。この研究炉の場合、燃料の供給及び資料済み燃料の処分が発電用のものと全く同様に行けるというメリットがあります。

核励起レーザーは、核分裂片の運動エネルギーでガスを励起して、レーザー発振を行う技術です。米国ではかなり前に研究は打ち切られていますが、ロシアでは現在も研究が続いているようです。レーザー発振のためのパルス炉の概念の検討と即発超臨界時の動特性解析の手法の開発を行いました。炉物理的には成立しましたが、レーザーの発振のためには発振媒体が透明である必要があり、ガスの場合効率がかなり低くなってしまふことが問題でし

た。ロシアでは現在も研究が続けられているようです。

4. ポロニウム研究

炉概念の研究ではないのですが、鉛・ビスマス共晶合金（以下「鉛ビスマス合金」）を高速炉や ADS の冷却材に使用したときにビスマスの中性子照射によって発生するポロニウム 210 についても研究を行いました。JAEA の JRR-4 を使って鉛ビスマス合金の中性子照射を行い、東工大の実験室で照射した鉛ビスマス合金の加熱溶融し、ポロニウムの蒸発、蒸発したポロニウムの金属材料表面への吸着及びベーキング法によるポロニウム表面汚染の除去などについて実験を行いました。ポロニウム 201 は α エミッターなのでその毒性が懸念されますが、そもそも高温で溶融した鉛ビスマス合金からのポロニウム 210 蒸発量は少なく、また表面汚染も真空中で高温にすると容易に除去でき、また低い温度（室温程度）の金属表面に非常によく吸着するのでこの特性を利用したポロニウムフィルターを作ることも可能です。鉛ビスマス合金を原子炉で使用する場合のポロニウムの発生の問題は技術的に十分解決可能という見通しを持っています。

余談ですが、この研究をしていたころ、英国でポロニウムを使った殺人事件が起きたというニュースが世界に流れ、たまたまポロニウムの実験をしていた私の研究室にテレビ各社（当時の東京のアナログチャンネルで 3（NHK 教育）以外の 1 から 12 まで全て）がカメラを持って押しかけ、実験装置を撮影し、時間をかけてインタビューしていきました。取材にはできるだけ丁寧に対応するよう心掛けましたが、テレビ取材というのは要は、自分の番組のストーリーに合う映像とコメントを切り取って使うために来るのだな、と感じました。

5. 高速炉

ウラン資源が限られていることを考えると、今後人類全体が原子力エネルギーを利用するのであれば最終的にそれに応えられるのはウラン資源を有効に利用できる高速炉のみと考えています。ただし、高速炉でウラン資源を有効に利用することを考えるならば、再処理のプロセスが不可欠であり、高速炉と再処理を行う燃料サイクルの確立はセットで実現すべきものと考えられてきました。しかしながら、抽出プルトニウムの兵器転用の懸念から国際的に再処理が容認されている国は限られており、また再処理システム自身が高価で多量の液体放射性物質の閉じ込めを担保しなければならないという課題もあるため、再処理システムを前提にした原子炉が世界全体の資源・エネルギー・低炭素社会の実現といった課題に応えられるとは思えません。そこで、再処理を前提とせず高い燃焼度が達成できる高速炉の研究に取り組みました。このタイプの原子炉には、ブリードバーン型炉(B&B 炉、UC バークレイ)、トラベリングウェーブリアクター (TWR、テラパワー)、CANDLE 燃焼炉（東工大関本）などがすでに提唱されており、研究・開発が進められています。ここでは、これらの高速炉すべてをその共通した特徴を表す B&B 炉と呼ぶことにします。B&B 炉研究の手始めに CANDLE 炉の解析を行いました。CANDLE 炉研究は東工大の関本研で行われていま

したが、研究を実施するにあたりコードやデータは一切関本研から引き継がず、出版されていた論文をもとに解析手法の開発とコード整備を小原研独自に行い、研究を進めました。B&B 炉は、装荷燃料を天然ウランまたは劣化ウラン（要は U-238 だけあればよい）として、炉内で中性子照射により核分裂性物質を作り出し、生成した核分裂性物質で核分裂連鎖反応を起こし、エネルギー発生と高燃焼度を再処理なしに達成することを目指した原子炉です。CANDLE 燃焼炉は燃焼領域が炉心軸方向に自律的に移動するもので、高い燃焼度が達成できます。課題としては、高い燃焼度ゆえに燃料被覆管の照射損傷が大きくなり、最後までたないということがありました。本研究では、燃料に金属燃料を用い、照射量が限界に達する前に米国 EBR-II で開発されたメルトリファイニング（金属燃料を溶かして再形成する技術）を行うことで、照射限界の問題を解決し、かつ CANDLE 燃焼が維持できるかを検討しました。解析の結果、このような手法を導入した場合でも CANDLE 燃焼は成立し、燃料の健全性を維持しつつ高燃焼度を達成できることがわかりました。また、B&B 型炉では、原子炉の起動時には核分裂性物質を装荷する必要があり、これは CANDLE 燃焼炉でも同様です。現在日本では軽水炉から取り出したプルトニウムがあり、これを CANDLE 炉の起動炉心に使用できるかどうかの検討も致しました。国内で保有するプルトニウムで CANDLE 炉を起動し、起動後は同じく国内で保有する劣化ウランを燃料として使用してエネルギーを発生させ続けるというコンセプトです。これについても、起動炉心のプルトニウムの配置を工夫することで CANDLE 燃焼炉が起動でき、現在国内で保有しているプルトニウムで出力 3000 MWt の CANDLE 燃焼炉約 80 基の起動が可能であることがわかりました。

CANDLE 燃焼炉は優れた炉概念ですが、燃焼領域が炉心軸方向に移動するため炉心の上下をいってみれば輪切りにして燃料の交換を行う必要があります。そこで、燃焼領域が動く代わりに燃料集合体を移動させ、その移動を軸方向でなく径方向に移動する（回転型シャッフリング）ことで実現させることを考えました（図 2）。まず、金属燃料と鉛ビスマス冷却材の組み合わせで試したところ、シャッフリングパターンやシャッフリングの時間間隔をうまく調整することで、燃焼領域がほとんど移動せず、炉内の出力分布が変化しない B&B 炉心が実現できることがわかりました。図 3 は、各燃料集合体の実効増倍率の分布の例です。天然ウラン燃料は Position ID 1 に装荷されて、順に 2,3,4,・・・と移動していきます。図から燃料集合体の炉心中心高さ付近の無限増倍率が先にピークをもち、その後減少しており、上下端では遅れてピークが来ています。この例では炉心の系方向中心付近で無限増倍率が最大となる燃料集合体に来るよう設計されているので、中性子インポートンスの高いところに無限増倍率の高い燃料が配置されることになり、炉内に親物質や FP を抱え込んでも原子炉を臨界とすることが可能となっています。この無限増倍率の分布は平衡状態では変化しません。この図では燃料集合体がステップ状に右に移動していますが、もし燃料集合体の位置が変わらないと頭の中で座標変換して眺めると、無限増倍率のピークが同じ形を保ちながら左へ移動している燃焼波が発生しているとみることができます。こう考えると、この炉心内では CANDLE 燃焼波と同じ現象が起きており、燃料集合体の方が一定速

度で動くため炉心内の無限増倍率分布が変化しない、結果的に炉内の出力分布も変化しないとみることができます。この回転型シャッフリングの利点は、シャッフリングパターンとシャッフリングの時間間隔を変えることで取出し燃料の燃焼度を変えることが可能である点で、燃料被覆管の照射限界になるまえに燃料集合体を取り出し、かつ炉内出力分布が変化しない B&B 炉心を実現することが可能なことが分かっています。現在、さまざまな条件を変えてこの炉概念の研究を進めています。

6. おわりに

近年革新炉特に SMR への関心が急激に高まっています。様々な炉概念とその利用方法についての検討が各所でなされていることと思います。小型炉に関して言えば、以前学会誌でも書いた通り 30 年以上前からさまざまな研究が行われており、多くの知見の蓄積があります (2)。急に必要になったからといって思い付きでいろいろやっても実現につながるような研究にはならないのは当然のことです。まず先人が行ってきた仕事をよく勉強することで、成立する可能性が低いコンセプトの研究に時間と労力を費やしてしまうことが避けられると思います。

なお、今回説明した研究はすべて小原研のメンバーによって実施されました。深く感謝の意を表したいと思います。

文献)

- (1) E. Teuchert, et al., "Simplification of the pebble bed high temperature reactor", *Proc. of SR/TIT*, pp. 315-326, 23-25 October 1991, Tokyo, Japan.
- (2) 小原徹, "SMR 開発の展望", 日本原子力学会誌, Vol.62, No.3, pp.25-26 (2020).

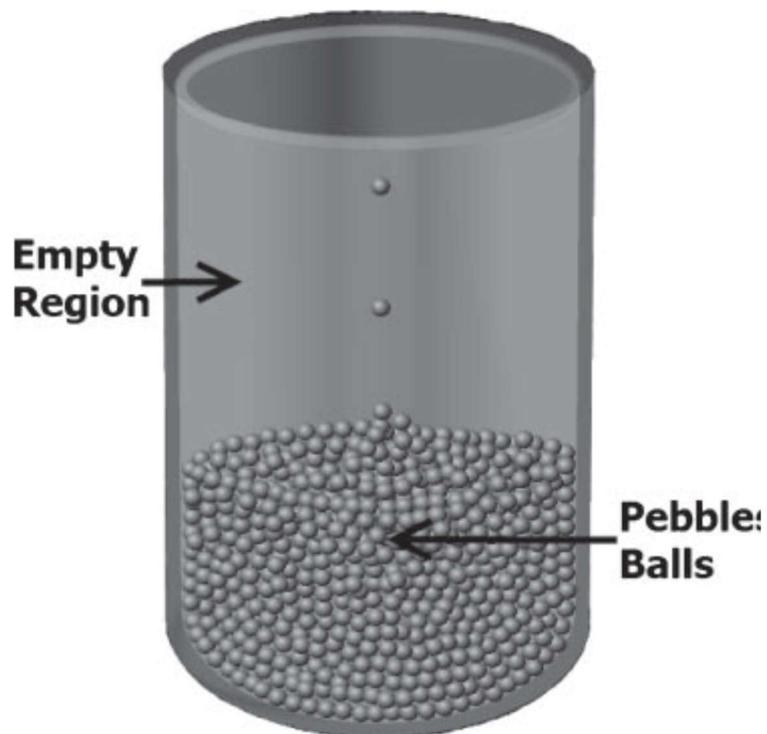


図 1 Peu a Peu 型ペブルベッド炉の概念

Dwi Irwant, Toru Obara, "Burnup Characteristics of a Peu a Peu Fuel Loading Scheme in a 110MWt Simplified Pebble Bed Reactor", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 48, p. 1386, Fig. 1 (2011).

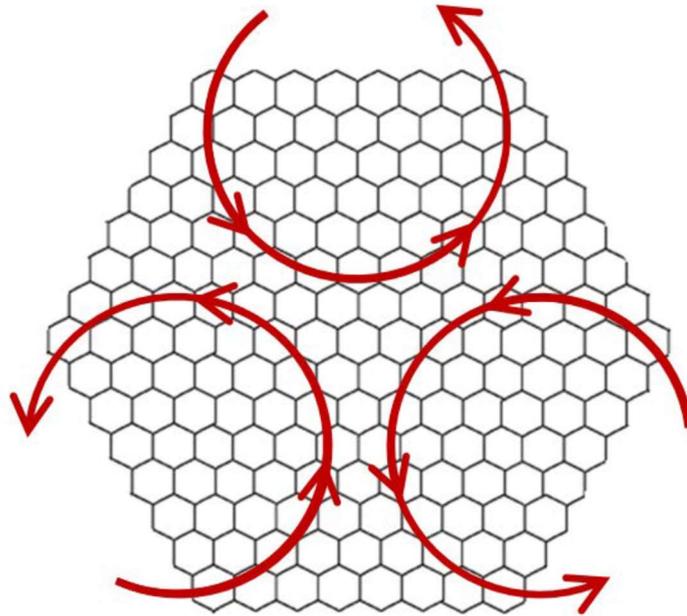


図 2 回転型燃料シャッフリングの概念 (炉心上からみた燃料集合体の移動を表す)
Toru Obara, Kazuki Kuwagaki, Jun Nishiyama, “Feasibility of Burning Wave Fast Reactor Concept with Rotational Fuel Shuffling”, *Proc. of FR-21*, IAEA-CN-245-051, FIG, 3, 26-29 June 2017, Yekaterinburg, Russia.

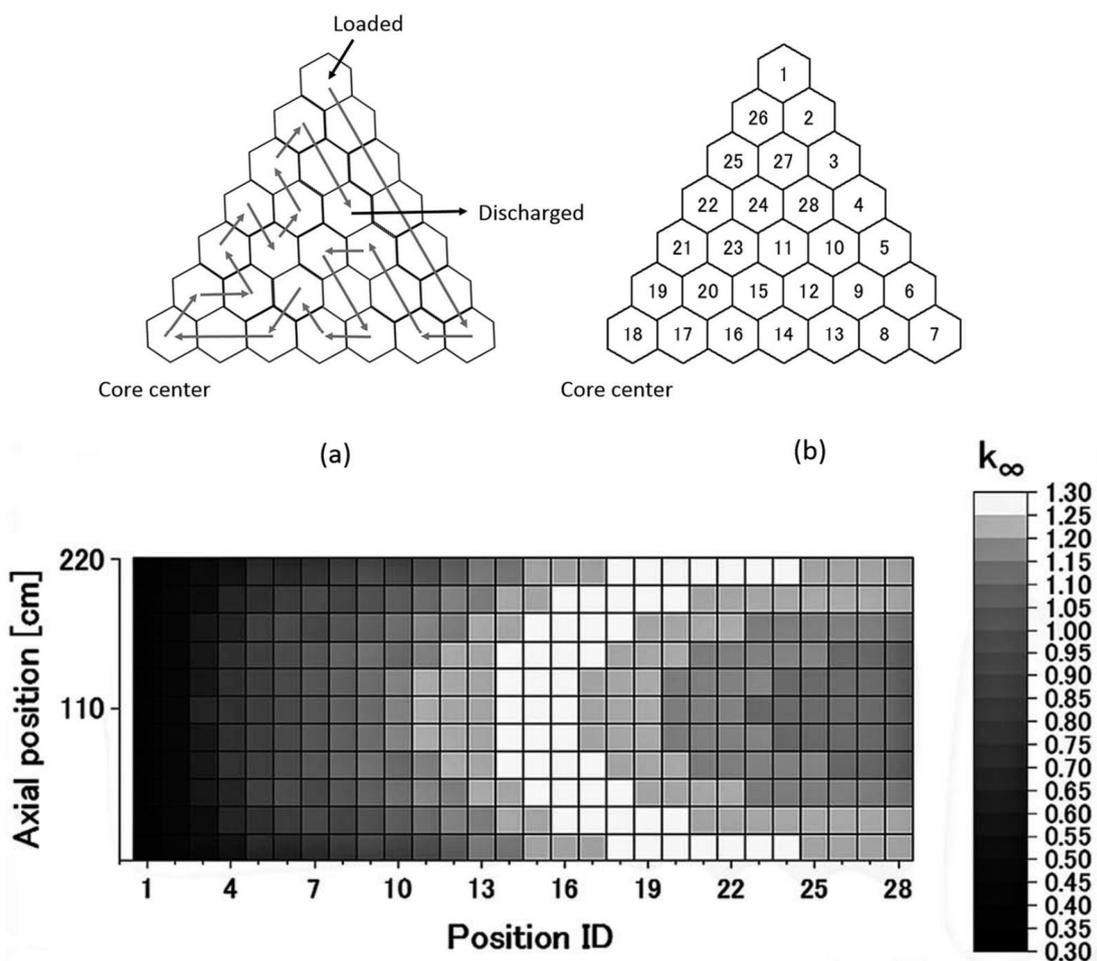


図 3 回転型シャッフリングでの平衡状態での核燃料集合体の無限増倍率分布の例
 (上の図は(a)1/6 炉心での燃料集合体の移動パターンと(b)燃料集合体の Position ID
 を表している)

Kazuki Kuwagaki, Jun Nishiyama, Toru Obara, "Concept of Stationary Wave Reactor with Rotational Fuel Shuffling", *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 191, p.183, Fig. 6 and p.185, Fig. 11 (2018). DOI: [10.1080/00295639.2018.1463744](https://doi.org/10.1080/00295639.2018.1463744)

各章の研究に対応する論文

・高温ガス炉

1. Irwan Liapto Simanullang, Toru Obara, “Burnup performance of MOX and Pu-ROX fuels in small pebble bed reactor with accumulative fuel loading scheme”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 120, pp. 450-460 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.014>
2. Irwan Liapto Simanullang, Toru Obara, “Burnup Performance of a PBR with an Accumulative Fuel Loading Scheme Utilizing Burnable Poison Particles in UO₂ and ROX Fuels”, *Energy Procedia*, Vol. 131, pp. 61-68 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.476>
3. Odmaa Sambuu, Jamyansuren Terbish, Toru Obara, Norov Nanzad, Munkhbat Byambajav, “Design parameters in an annular, prismatic HTGR for passive decay heat removal”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 111, pp. 441-448 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.09.034>
4. Irwan Liapto Simanullang, Toru Obara, “Burnup performance of rock-like oxide (ROX) fuel in small pebble bed reactor with accumulative fuel loading scheme”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 107, pp. 110-118 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.04.019>
5. **Odmaa Sambuu, Toru Obara**, “Possible design of PBR for passive decay-heat removal”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 53, No. 9, pp. 1296-1309 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2015.1105162>
6. Irwan Liapto Simanullang, Toru Obara, “Improvement of core design of small pebble bed reactor with accumulative fuel loading scheme”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 94, pp. 87-92 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2016.02.027>
7. Hai Quan Ho, Toru Obara, “Design concept for a small pebble bed reactor with ROX fuel”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 86, pp. 471-478 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.007>
8. Odmaa Sambuu, Toru Obara, “Neutronic and thermo-hydraulic analyses of a small, long-life HTGR for passive decay-heat removal”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 52, No. 12, pp. 1519-1529 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2015.1017546>
9. Odmaa Sambuu, Toru Obara, “Impact of power density profile on passive decay-heat removal in prismatic HTGR”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 87, pp. 23-29 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.07.036>
10. Topan Setiadipura, Toru Obara, “Optimization of Start-up Fuel Management for OTTO Cycle Pebble Bed Reactor”, *Energy Procedia*, Vol. 71, pp. 42-51 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.853>
11. **Piyatida Trinuruk**, Toru Obara, “Particle-type Burnable Poisons for Thorium-based Fuel in HTGR”, *Energy Procedia*, Vol. 71, pp. 22-32 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.851>
12. Odmaa Sambuu, Toru Obara, “Comparative study on HTGR Designs for Passive Decay Heat Removal”, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 82, pp. 37-45 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.07.013>
13. Odmaa Sambuu, Toru Obara, “Above-ground HTGR design for passive decay heat removal” *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 52, No. 6, 857-871 (2015) DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2014.986242>
14. Hai Quan Ho, Toru Obara, Burnup performance of OTTO cycle pebble bed reactors with ROX fuel *Annals of Nuclear Energy*, **83**, 1-7 (2015). DOI: [10.1016/j.anucene.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.04.001)
15. Sambuu Odmaa, Toru Obara “Possible design in long-life small prismatic HTGR for passive decay heat removal”, *Nuclear Science and Engineering*, **177**, 97-109 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.13182/NSE13-22>
16. Topan Sediadipura, Toru Obara, “Development of Monte Carlo-based pebble bed reactor fuel management code” *Annals of Nuclear Energy*, **71**, 313-321 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.04.010>
17. **Piyatida Trinuruk**, Toru Obara, “Concept of prismatic high temperature gas-cooled reactor with SiC coating on graphite structures”, *Annals of Nuclear Energy*, **63**, 437-445 (2013). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2013.08.019>

18. Piyatida Trinuruk, Toru Obara, "Small, long-life high temperature gas-cooled reactor free from prompt supercritical accidents by particle-type burnable poisons", *Journal of Nuclear Science and Technology*, **50** (9), 898-912 (2013). DOI: 10.1080/00223131.2013.815138
19. Dwi Irwanto, Toru Obara, "Decay Heat Removal without Forced Cooling on a Small Simplified PBR with an Accumulative Fuel Loading Scheme", *Annals of Nuclear Energy*, **60**, 383-395 (2013).
20. Toru Obara, Taiki Onoe, "Flattening of burnup reactivity in long-life prismatic HTGR by particle type burnable poisons", *Annals of Nuclear Energy*, **57**, 216-220 (2013).
21. Odmaa Sambuu, Toru Obara, "Conceptual design for a small modular district heating reactor for Mongolia", *Annals of Nuclear Energy*, **47**, 210-215 (2012).
22. Dwi Irwanto, Toru Obara, "Burnup Characteristics and Fuel Cycle Economics of Mixed Uranium-Thorium Fuel in a Simplified Small Pebble Bed Reactor", *Journal of Nuclear Science and Technology*, **49** [2], pp 222-229, (2012)
23. Dwi Irwanto, Toru Obara, "Burnup Characteristics of a Peu a Peu Fuel-loading Scheme in a 110-MWt Simplified Pebble Bed Reactor", *Journal of Nuclear Science and Technology*, **48** [11], pp 1385-1395, (2011)
24. H.Q.Huda, T.Obara, "Development and testing of analytical models for the pebble bed type HTRs", *Annals of Nuclear Energy*, **35** [11], 1994-2005 (2008).
25. Toru OBARA and Hiroshi SEKIMOTO, "Feasibility of Zero Temperature Coefficient Core with Highly Diluted Fuel and Graphite Moderator," *Annals of Nuclear Energy*, **22**[6], 331-337(1995).
26. Toru OBARA and Hiroshi SEKIMOTO, "New Numerical Method for Equilibrium Cycles of High Conversion Pebble Bed Reactors," *Journal of Nuclear Science and Technology*, **28** [10], 947-957 (1991).

・ 研究炉・核励起レーザー

27. Byambajav Munkhbat, Toru Obara, “Conceptual design of a small nuclear reactor for large-diameter NTD-Si using short PWR fuel assemblies”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **50** [1], pp.46-58 (2013).
28. Byambajav Munkhbat, Toru Obara, “Design simplification of a small nuclear reactor for large-diameter neutron transmutation doping silicon using control rods”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **49** [8], pp. 845-856, (2012).
29. Byambajav Munkhbat, Toru Obara, “Design Concept of a Small Nuclear Reactor for Large-Diameter NTD-Si using a Conventional PWR Full-Length Fuel Assembly”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **49** [5], pp. 535-543, (2012).
30. Toru Obara, Hiroki Takezawa, “Pulse reactor system for nuclear-pumped laser using low-enriched uranium”, *Energy Conversion and Management*, **49**, 1892-1897 (2008).
31. Hiroki Takezawa, Toru Obara, Andrey Gulevich and Oleg Kukharchuk, “Criticality Analysis of Pulse Core and Laser Module Coupled Small Reactor with Low Enriched Uranium,” *Progress in Nuclear Energy*, **50**, 304-307 (2008).
32. Toru OBARA and Hiroshi SEKIMOTO, “Concept and Basic Performance of an In-pile Experimental Reactor for Fast Breeder Reactors using Fast Driver Core”, *Annals of Nuclear Energy*, **24** [18], 1491-1513 (1997).
33. Toru OBARA and Hiroshi SEKIMOTO, “Design Concept of Fast Spectrum Pulse Reactor with Packed Core of Coated Dilute Fuel Particles,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, **33** [7], 547-554 (1996). DOI: 10.1080/18811248.1996.973195

・ ポロニウム研究

34. Toru Obara, Yu Yamazawa, Toshinobu Sasa, “Polonium Decontamination Performance of Stainless Steel Mesh Filter for Lead Alloy-Cooled Reactors”, *Progress in Nuclear Energy*, **53**, pp 1056-1060, (2011)
35. Toru Obara, Takeru Koga, Terumitsu Miura and Hiroshi Sekimoto, “Polonium Evaporation and Adhesion Experiments for the Development of Polonium Filter in Lead-Bismuth Cooled Reactors,” *Progress in Nuclear Energy*, **50**, 556-559 (2008).
36. Terumitsu Miura, Toru Obara, Hiroshi Sekimoto, “Experimental verification of thermal decomposition of lead polonide”, *Annals of Nuclear Energy*, **35**[11], 926-930 (2007)
37. Toru Obara, Terumitsu Miura, Hiroshi Sekimoto, “Development of Polonium Surface Contamination Measure in Lead-Bismuth Eutectic Coolant,” *Progress in Nuclear Energy*, **47** [1-4], 577-585 (2005).
38. Terumitsu Miura, Toru Obara, and Hiroshi Sekimoto, “Removal of Polonium from Stainless Steel Surface contaminated by Neutron Irradiated Lead-Bismuth”, *Progress in Nuclear Energy*, **47** [1-4], 624-631 (2005).
39. T. Obara, T. Mirura, H. Sekimoto, “Fundamental Study of Polonium Contamination by Neutron Irradiated Lead-Bismuth Eutectic,” *Journal of Nuclear Materials*, **343** [1-3], 297-301 (2005).
40. Terumitsu Miura, Toru Obara, Hiroshi Sekimoto, “Unfolding of polonium distribution in depth of irradiated lead-bismuth eutectic from α -particle pulse-height distribution,” *Applied Radiation and Isotopes* **61**, 1307-1311 (2004).
41. Toru Obara, Terumitsu Miura, Yoshiyuki Fujita, Yasuo Ando, and Hiroshi Sekimoto, “Preliminary Study of the Removal of Polonium Contamination by Neutron-Irradiated Lead-Bismuth Eutectic,” *Annals of Nuclear Energy*, **30**, 497-502 (2003).

・高速炉

42. Hoang Hai Nguyen, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Optimization of reactor size in the small sodium-cooled CANDLE burning reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 153, 108040 (2021). DOI: [10.1016/j.anucene.2020.108040](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108040)
43. Hoang Hai Nguyen, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Burnup Performance of CANDLE Burning Reactor Using Sodium Coolant”, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 194, pp. 1128-1142 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1080/00295639.2020.1775433>
44. Kazuki Kuwagaki, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Evaluation of Discharged Fuel in Preproposed Breed-and-Burn Reactors from Proliferation, Decay Heat, and Radiotoxicity Aspects”, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 194, pp. 405-413 (2020).
45. Van Khanh Hoang, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Effects of compensating for fuel losses during the melt-refining process for a small CANDLE reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 135, 106969, January (2020). Published on line. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.106969>
46. Hiroki Osato, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Application of Melt-refining Process to Transition State of CANDLE Burning Fast Reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 128, pp. 77-83 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.12.038>
47. Kazuki Kuwagaki, Jun Nishiyama, and Toru Obara, “Concept of breed and burn reactor with spiral fuel shuffling”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol 127, pp. 130-138 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.12.006>
48. Kazuki Kuwagaki, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Concept of Stationary Wave Reactor with Rotational Fuel Shuffling”, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 191, pp. 178-186 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1080/00295639.2018.1463744>
49. Hiroki Osato, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Initial core design of CANDLE burning fast reactor using plutonium from LWR spent fuel”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 120, pp. 501-508 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.015>
50. Van Khanh Hoang, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Design concepts of small CANDLE reactor with melt-refining process”, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 108, pp. 233-242 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.05.019>
51. Hiroki Osato, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Study on CANDLE Burning Fast Reactor with Initial Core Using Plutonium from LWR Spent Fuel”, *Energy Procedia*, Vol. 131, pp. 15-20 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.440>
52. Julia Abdul Karim, Jun Nishiyama, Toru Obara, “Effects of cooling interval time in melt and refining process for CANDLE burning”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 105, pp.144-149 (2017). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.03.011>
53. Van Khanh Hoang, Toru Obara, “Impact of Neutron Spectrum Shift on Breed and Burn Reactor Concept”, *Energy Procedia*, Vol. 131, pp. 33-44 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.443>
54. Julia ABDUL KARIM, Jun NISHIYAMA, Toru OBARA, “Application of melt and refining procedures in the CANDLE reactor concept”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 90, pp. 275-283 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.12.001>