

## 定在波型ブリードバーン高速炉の概念研究

東京工業大学 環境・社会理工学院  
桑垣 一紀

この度は、2019 年度、第 13 回日本原子力学会炉物理部会賞にご選出いただきましたこと、大変光栄に思います。このような機会を設けていただいた炉物理部会の皆様に心より御礼を申し上げます。また、本研究を進めるうえで、ご指導・ご助言くださいました東京工業大学の小原徹先生、西山潤先生にもこの場をお借りして御礼申し上げます。

### 1. はじめに

受賞の対象となった本研究は、私が東京工業大学小原研究室で修士 1 年から博士 3 年までの 5 年間に行った、ブリードバーン高速炉 (Breed and Burn fast reactor 以下、B&B 炉) と呼ばれる次世代型高速炉に関する設計研究<sup>1-4</sup>です。B&B 炉では、天然ウラン燃料中で核分裂性物質を生み出し、それを燃焼させることで炉心を運転します (詳細は次章で述べます)。この概念は 1958 年に S・M・ファインバーグ氏によって初めて提案されましたが<sup>5</sup>、その後も様々な角度から研究が進められてきました。2000 年には東京工業大学の関本博先生が CANDLE 燃焼方式<sup>6</sup>を考案されましたが、この方式を用いた炉心も B&B 炉の一種に分類することができます。2006 年頃にマイクロソフトのビル・ゲイツ氏が、B&B 炉の実用化を目指して研究・開発を行う米国の Terra Power 社<sup>7</sup>に出資を始めたことでこの炉心概念に注目が集まり、世界的に研究が活発になりました。

### 2. ブリードバーン高速炉の概要と課題点

B&B 炉の初期炉心は濃縮燃料と天然ウラン燃料 (または劣化ウラン燃料) から構成されます。濃縮燃料から天然ウラン燃料へ中性子が供給され、天然ウラン中の U-238 が Pu-239 へと転換されます。十分に Pu-239 が生成されると濃縮燃料が取り出され、新たに天然ウラン燃料が装荷されます。この新たに装荷された燃料に、すでに生成された Pu-239 の核分裂から発生する中性子が供給され、新たな Pu-239 が生み出されます。このプロセスを繰り返すことで、B&B 炉は、炉心起動時を除けば天然ウラン燃料のみで運転を行うことができます。また、原理的に燃料を高燃焼度(400~500 GWd/t-HM 程度)まで燃焼させることができます。

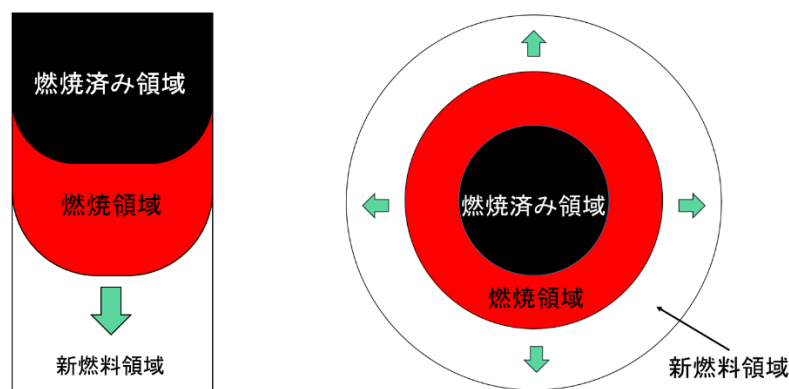
このような原理を用いた炉心では、核分裂が活発な燃焼領域が新たに装荷された天然ウランからなる新燃料領域へと移動していくという現象が起きます。この移動する核分裂の

活発な領域のことを「燃焼波」や「Traveling wave」と呼んだりします。燃焼波は非常に興味深い物理現象ですが、炉設計という観点からすると、燃焼波の移動に伴い出力分布といった炉特性が大きく変化してしまうという問題があります。運転中に出力分布が大きく変化してしまうと、冷却材流量調整等の炉心制御作業が複雑になってしまいます。

B&B 炉は、燃焼波の移動方向によって二つのパターンに分類することができます。関本博先生が考案した CANDLE 炉では、図 1(a)のように燃焼波が炉心の軸方向へと移動していきます。燃焼波の移動に伴い出力の高い領域も炉心軸方向へと移動するのですが、出力分布の形が一定となって移動していくので、炉特性の変化が小さいという利点があります。しかし、長期的な運転のためには炉心を軸方向に分割して燃料を交換する必要があり、そのための新たな技術開発が必要となってしまいます。カリフォルニア大学バークレー校 (University of California, Berkeley 以下、UCB) では燃料集合体を軸方向に分割してシャッフリングするような B&B 炉が考案され、軸方向に分割できる燃料集合体の設計研究<sup>8</sup>が行われていますが、まだ概念研究の段階です。

先の Terra Power 社は、図 1(b)のような燃焼波が炉心径方向に移動していく設計を考案しています<sup>9</sup>。径方向へ燃焼波が進む場合は燃料を集合体単位で交換することができ、CANDLE 炉のように燃料交換の問題は生じません。しかし、径方向への燃焼波の移動に伴い出力分布が大きく変化してしまうという問題が生じます。

本研究では、これら二つのタイプの B&B 炉の課題を同時に解決できる方法を考案しました。例えば、径方向へ燃焼波が進む炉心 (図 1 (b)) において、燃焼波が進む方向と反対方向に燃料集合体を移動させながら炉心を燃焼させれば、燃焼波が一定の領域に定在するのではないかと期待できます。また、燃料を集合体単位で交換でき、燃料交換の問題も生じません。この燃焼波と逆方向に燃料要素を移動させるという方法は本校の小原徹先生が考案したアイデアですが、UCB や Terra Power 社でも独自に、燃焼波が定在するような B&B 炉が設計されています<sup>10</sup>。



(a) CANDLE 燃焼方式 (炉心軸方向に燃焼領域が移動するタイプ) (b) 炉心径方向へ燃焼領域が移動するタイプ

図 1 : 燃焼領域の移動方向によって分類される、二つのタイプの B&B 炉

本研究では、以上に述べたように、燃料集合体を移動させることで燃焼波が定在する B&B 炉が設計可能か、その成立性を明らかにすることを目的としました。

### 3. 本研究の概要：定在波型ブリードバーン高速炉の設計

次に、燃焼波をどのように定在させるかということを考える必要があります。B&B 炉には、天然ウラン燃料や燃焼済みの燃料といった反応度の低い燃料が含まれ、臨界性が悪いといった課題があります。炉心の臨界性は、図 3(c)のように核分裂が活発な領域（すなわち燃焼波）を炉心中心の中性子インポートランスの高い領域に位置させることで向上させることができます。そこで、燃焼波を炉心中心に定在させる設計を目指すこととしました。

天然ウランの無限増倍率（図 2）は、最初は非常に低くですが、核分裂性物質の生成に伴い急激に上昇し、その後徐々に減少していくという変化を示します。本研究では、図 3(a)、(b)に示すような円周回転型、及びスパイラル型の二つの移動パターンを考案しました。円周回転型では平均取り出し燃焼度を無限増倍率のピークを過ぎた 310 GWd/t-HM 付近としました。そこで、燃料を炉心外側から装荷し、中心に移動させ、その後再び外側に移動させ取り出すパターンとしました。このようなパターンで炉心中心に増倍率のピークがくるように調整すれば、図 3(c)に示したように、核分裂が活発な燃料が炉心中心領域に常に配置されることが期待できます。一方で、スパイラル型では平均取り出し燃焼度を増倍率のピーク付近の 115 GWd/t-HM としました。そのため、燃料が外側から装荷され、徐々に中心に移動していき、中心で取り出すパターンとしました。

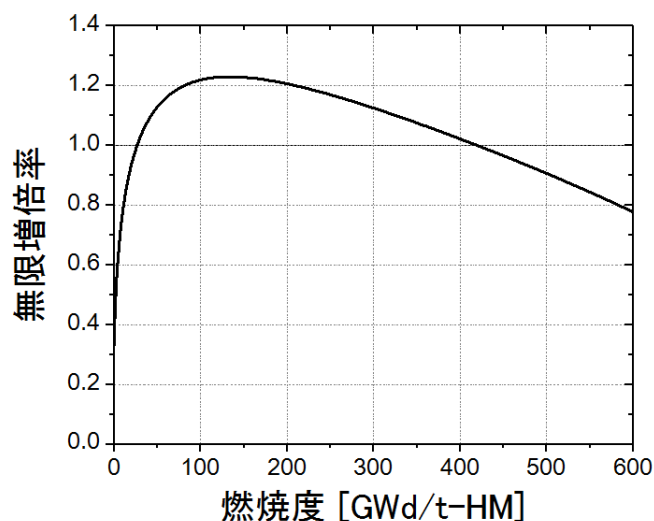


図 2：天然ウラン燃料の無限増倍率の変化

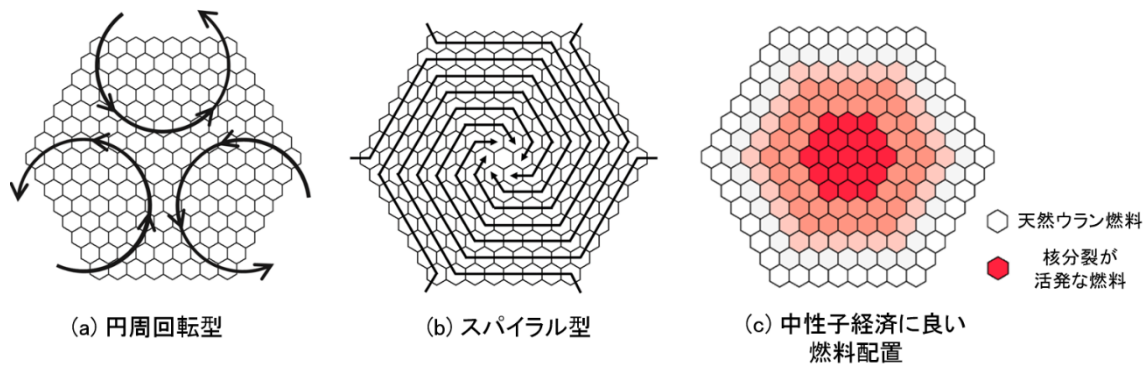


図3：移動パターンと中性子経済に良い燃料配置の概念図

炉心デザインは、小原研究室で研究されてきた CANDLE 炉心を参考とし、高さ 220.0cm の鉛ビスマス冷却金属燃料炉心としました。円周回転型の場合は炉心出力を 800MWt、相当半径を 123.4cm とし、スパイラル型の場合は炉心出力を 450MWt、相当半径を 137.1cm としました。解析は MVP/MVP-BURN<sup>11,12</sup> と JENDL-4.0<sup>13</sup> を用いて行いました。炉心は図 4(c) に示したように 168 本の燃料集合体と炉心中心の冷却材チャンネルから構成されます。炉心を六分の一対称領域に分割し、それぞれの領域で図 4(a)、(b) に示すようなパターンで燃料集合体を移動させました。各集合体は矢印に沿って一つ隣のポジションへと移動します。燃料集合体をシャッフリングしながら燃料の装荷と取り出しが行われ、一回のシャッフリングで 6 体の新燃料集合体が装荷されます。

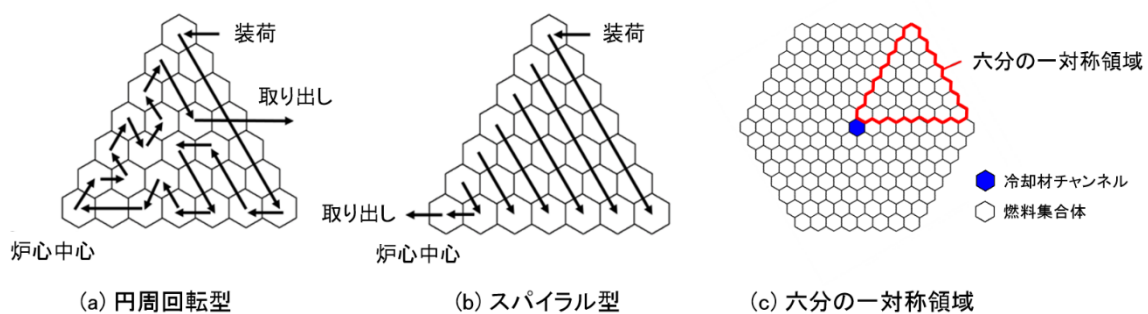


図4：実際の計算で用いた六分の一対称領域での移動パターン

B&B 炉は、炉心起動後に一定周期で、一定のパターンで燃焼済み燃料の取り出しと天然ウランからなる新燃料の装荷を繰り返していくと、主要核分裂性物質の変化が収束し、図 5 に示すように増倍率の変化が一定となる平衡サイクルに達します。図 6 に両炉心の平衡サイクルでの出力分布を示します。両炉心ともに非常に出力分布の変化が小さいことがわかります。一方で、径方向出力ピークが非常に高くなっていますが、これは炉心外側に反応度の低い燃料が位置し、炉心中心に反応度の高い燃料が位置するためです。平衡状態に達した

B&B 炉は一般的に一種類の燃料（様々な燃焼度の天然ウラン燃料）で炉心が構成されますが、炉心外側の反応度の低い燃料は高速炉のブランケット燃料のような役割を担っているとも言えます。

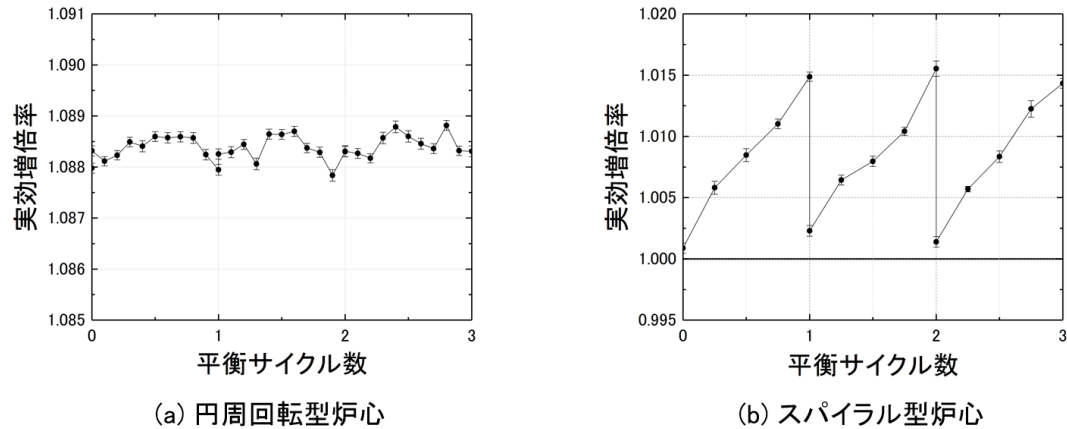


図 5：平衡サイクルでの実効増倍率

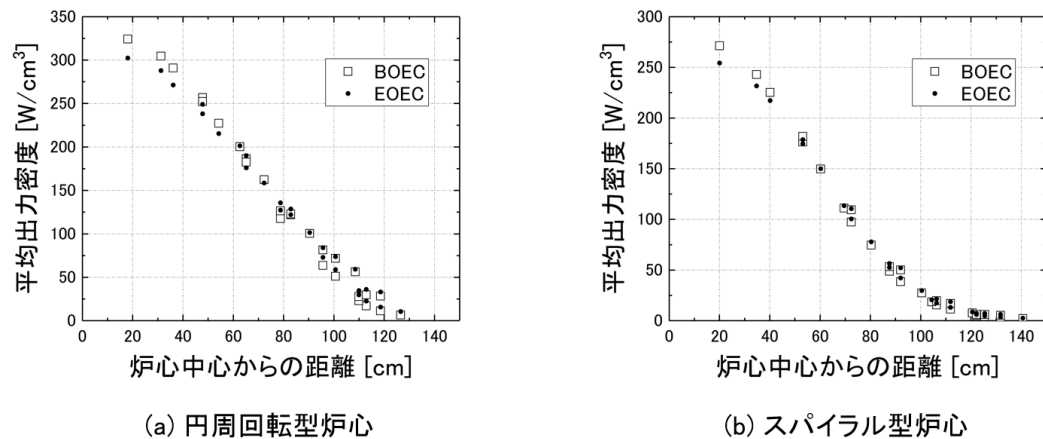


図 6：平衡サイクル開始時(BOEC)と平衡状態終了時(EOEC)での径方向出力分布

次に、図 7、8 に平衡サイクル終了時での各燃料集合体の無限増倍率を示します。横軸は移動ステップとなっていますが、これは図 4 に示した移動パターンの順番に沿った番号となっています。各燃料集合体が移動ステップに沿って並べられた形となっています。どちらの炉心においても、炉心中心の領域に核分裂が活発な燃料が位置していることが確認できます。また、円周回転型の場合は CANDLE 炉のような形になっています。CANDLE 炉のように核分裂が活発な領域が炉心径方向（燃焼ステップ 1 の方向）に移動していくのですが、燃料集合体がそれとは逆方向に移動するため、燃焼波が炉内の一定領域に定在します。

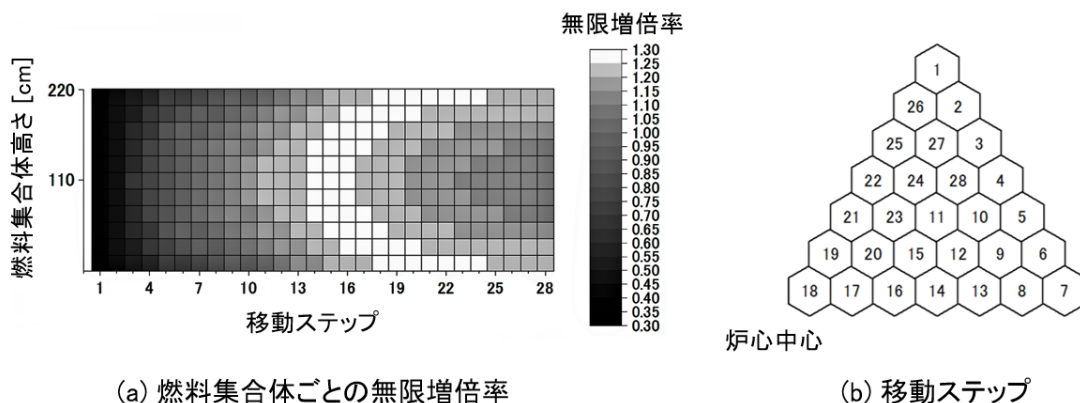


図 7：円周回転型の場合の燃料集合体ごとの無限増倍率

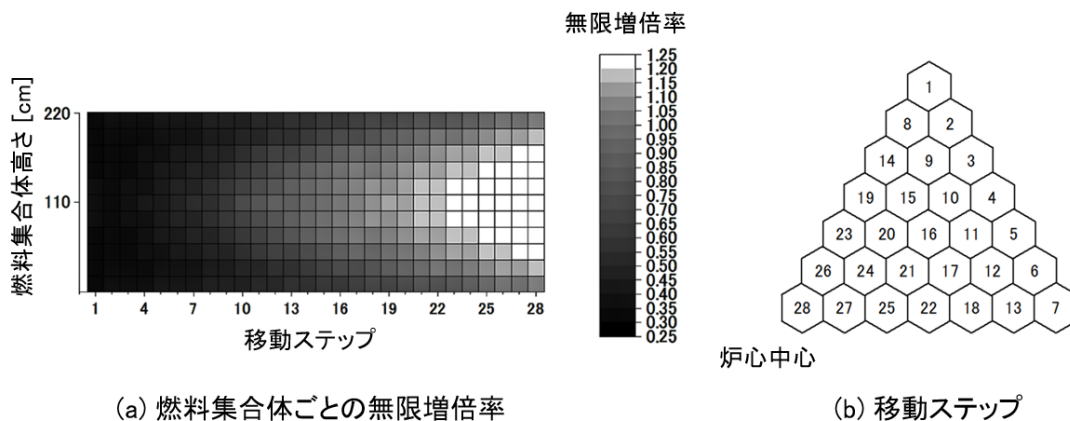


図 8：スパイラル型の場合の燃料集合体ごとの無限増倍率

以上の結果により、本研究では、燃焼波が炉心中心の中性子インポートランスの高い領域に定在し、運転中に出力分布が変化してしまうこと、反応度の低い燃料が含まれ炉心の臨界性が悪いことといった B&B 炉の課題を解決できる、定在波型 B&B 炉の炉心設計とその成立性が示されました。

#### 4. 最後に

私事ですが、本研究は私にとって初めて長期的に取り組んだ研究となりました。自分の未熟さゆえに何度も失敗をするという苦い経験もしましたが、本研究を通して多くのことを学ばせてもらったと実感しています。炉心の中で核分裂が活発な領域が移動していく、この燃焼波という現象は、物理系出身の私にとってとても興味深く、研究に邁進することができました。私は今年で本校を卒業し、本研究からは離れてしましますが、今後この研究を引き継いでいく人たちがどのような形でこの概念の研究を進めていくのか、期待と共にその進展を願っております。

参考文献:

1. T. OBARA, K. KUWAGAKI and J. NISHIYAMA, "Feasibility of burning wave fast reactor concept with rotational fuel shuffling.", Proc. Int. Conf. of Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), Yekaterinburg, Russia (2017).
2. K. KUWAGAKI, J. NISHIYAMA and T. OBARA, "Concept of Stationary Wave Reactor with Rotational Fuel Shuffling", Nucl. Sci. Eng., 191, 178-186 (2018).
3. K. KUWAGAKI, J. NISHIYAMA and T. OBARA, "Concept of Breed and Burn Reactor with Spiral Fuel Shuffling", Ann. Nucl. Energy, 127, 130-138 (2019).
4. K. KUWAGAKI, J. NISHIYAMA and T. OBARA, "Evaluation of discharged fuel in pre-proposed breed-and-burn reactors from proliferation, decay heat, and radiotoxicity aspects", Nucl. Sci. Eng., [2019/12/16 accepted] (2019).
5. S.M. FEINBERG, Discussion Comment in ICP UAE 1958, Geneva, Switzerland.
6. H. SEKIMOTO and K. RYU, "A new reactor burnup concept CANDLE", Physor 2000, American Nuclear Society, Pittsburgh, USA (2000).
7. J. GILLELAND, R. PETROSKI, K. WEAVER, "The Traveling Wave Reactor: Design and Development", Engineering, 2, 88-96 (2016).
8. J. HOU et al., "3-D Fuel Shuffling for Reduced Peak Burnup and Increased Uranium Utilization of Breed-and Burn Reactors," Prog. Nucl. Energy, 88, 58 (2015).
9. K.D. WEAVER et al., "A Once-Through Fuel Cycle for Fast Reactors", Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 17), ICONE17-75381, Brussels, Belgium (2009).
10. E. GREENSPAN, "A Phased Development of Breed-and-Burn Reactors for Enhanced Nuclear Energy Sustainability", Sustainability, 4, 2745-2764 (2012).
11. Y. NAGAYA, K. OKUMURA, T. MORI and N. MASAYUKI, "MVP/GMVP II: General purpose Monte Carlo codes for neutron and photon transport calculations based on Continuous Energy and Multigroup Method," JAERI-1348, Japan Atomic Energy Research Institute (2005).
12. K. OKUMURA, Y. NAGAYA and T. MORI, "MVP-BURN: Burn-up Calculation Code using a Continuous-energy Monte Carlo Code MVP." Draft report for JAEA-Data/Code, Japan Atomic Energy Research Institute (2005).
13. K. SHIBATA et al., "JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering." J. Nucl. Sci. Technol., 48 (2011).