

5. 1 革新型原子炉

5.1.2 CANDLE 燃焼炉

関本 博

1. 燃焼法 の概念

最初に CANDLE 燃焼法とはどういうものかについて説明する。CANDLE とは Constant Axial Shape of Neutron Flux, Nuclide Densities and Power Shape During Life of Energy Production の頭文字から作られた造語であるが、あたかも蠟燭のように燃えることを表してもいる。即ち、この燃焼法を採用すると、図 1 に示すように、燃焼に伴い燃焼領域は、核種や中性子束や出力の空間分布を変えることなく、軸方向に出力と比例した速さで移動していく。ここで重要なのは、燃料は従来の設計と同じように炉心に固定されたままであるにもかかわらず、制御棒や反射体制御のような可動式燃焼反応度制御は一切不要であるということである。なお炉心高さは本燃焼法の特徴を解りやすくするため、極端に長くとってある。

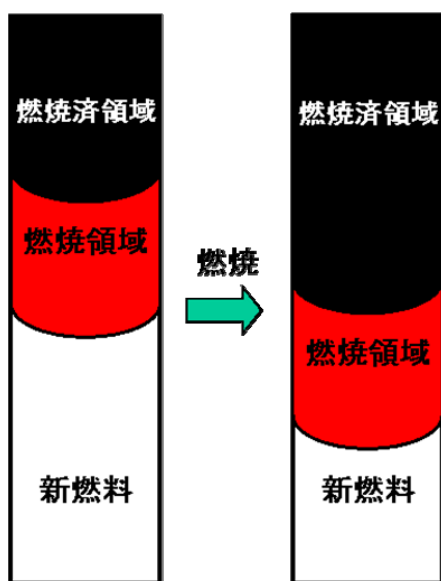


図 1 CANDLE 燃焼（移動方向は逆も可能。炉心高さは説明のため極端に長くとってある。）

通常の炉心では燃焼済み領域と新燃料領域を合わせた長さは燃焼領域の長さに比べてかなり短くとられる。実際の炉のイメージは後で示す図 2 の方が適切である。図 2 ですら移動距離は大きめに描いてある。なおこの図では燃焼領域は上から下へ移動しているが、もちろん下から上への移動でも可能である。

色々な種類の原子炉で CANDLE 燃焼が可能なことを示しているが、我々は特に CANDLE 燃焼高速炉に注目し、研究を続けている。

高速炉で CANDLE 燃焼させる場合、新燃料はそれだけでは臨界にならない燃料を用いる。我々の研究で天然ウランや劣化ウラン（濃縮の後に残るウラン）を新燃料に使えることが判った。この場合、燃焼領域から新燃料領域に漏れ出た中性子は新燃料の主成分である U-238 に吸収される。中性子を吸収した U-238 は核分裂性物質であるプルトニウムに変わり、新燃料領域を燃焼領域に変換していく。一方燃焼領域の反対側の境界ではプルトニウムへの変換はむしろ減ってきているにも係わらず、中性子が無駄食いする核分裂生成物が蓄積してきており、やがてこの領域は燃焼領域から燃焼済領域への変換していく。このようなことから、燃焼領域は燃焼済領域から新燃料領域へと移動していくのである。

付け加えると、CANDLE 燃焼では出力レベルが変化したとしても出力分布は絶対値が変化するだけで、その相対的な形は変化しない。燃焼領域の移動速度は出力レベルに比例する。

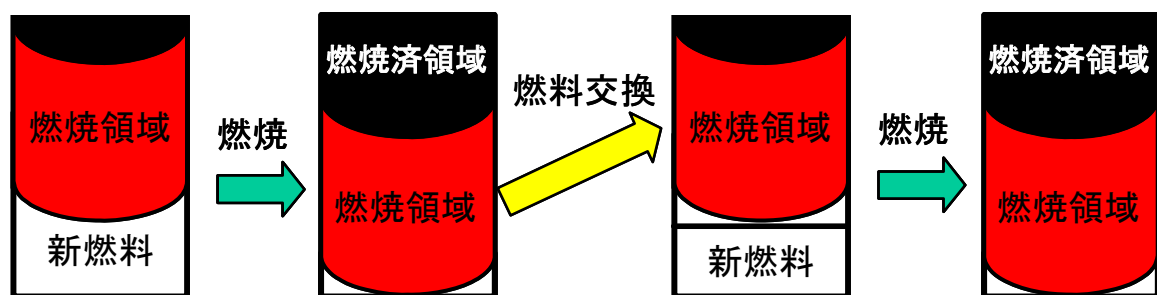


図2 CANDLE 燃焼における燃料交換

炉心の高さは実際には有限である。燃焼領域が炉心の端に達したら、燃料交換しなければならない。この様子を図2に示す。

燃焼領域が炉心の端に達したら、燃焼済領域を取り除き、燃焼の進行方向に新燃料を加える。こうすると CANDLE 燃焼を再開できる。新燃料は軸方向に一樣な組成でよく、製作は簡単になる。

いったん第1炉心がうまくできたら、後は簡単となる。但し、第1炉心の燃焼領域を構成するのは難しい問題になるかもしれない。第1炉心に関しては、多くの研究を既にしており、20%以下の低濃縮ウランで炉心を構成できることを示している。

2. 燃焼方式の特長と問題点

CANDLE 燃焼は多くの特長を有している。高速炉に限らず、一般の CANDLE 炉に関する特長を先ず述べ、その後、高速炉に適用した場合の非常に優れた特長について述べる。

(I-A) 一般的な特長

1) 燃焼制御のための制御装置が不要となる。

現在使用されている原子炉では、燃料交換した後一定期間運転を続けた後、再び燃料交換をして、更に運転を続けるといったことになっている。燃料を炉心に入れたまま運転を続けると核分裂性物質は消費され、中性子が無駄食いする核分裂生成物が蓄積する。このため臨界特性が悪くなってくる。燃料交換の間隔を充分長く取るためには、燃料交換直後の実効中性子増倍係数を1より充分大きくとっておく必要がある。これだけだと超臨界になるので、制御棒を挿入するなどして原子炉を丁度臨界になるように調節している。これでは中性子の無駄食いが大きくなり、しかも制御棒の故障や誤操作が重大な事故に繋がる可能性がある。CANDLE 燃焼では燃焼反応度調節のための制御棒といったものを必要とせず、次のような特長が期待できる。

- 中性子の無駄食いが無くなる。
- 燃焼制御が不要となり、運転が簡単で容易となる。
- 制御棒の炉心への挿入は出力分布を大きくゆがめ、しかも燃焼とともに大きく変化する。このような効果は、平均出力密度を抑え、経済性を悪化させる。CANDLE 燃焼ではこのようなことはない。
- 燃焼のための制御棒が無く、制御棒誤引き抜き事故は排除される。
- 原子炉に入れっぱなしの制御棒はその能力が低下していく。このような変化に対する対策が不要となる。

2) 燃焼に伴う炉心特性の変化がない。

従来の原子炉では、燃焼にともない出力密度ピーキングファクターや反応度出力係数が大きく変化する。このため、原子炉の制御法はこの効果を充分考慮したものでなければならない。CANDLE ではこのような原子炉特性パラメータが燃焼を通じて一定なので、運転方法は変化せず、極めて簡単に信頼性のあるものになる。

炉物理計算（臨界特性、出力分布、反応度出力係数などを計算する）の精度は、多数の臨界実験を通じて極めて高精度になっている。しかし燃焼が進んだ場合の炉物理計算は実験による検証が難しく、新燃料の炉物理計算に比べて誤差がかなり大きい。このため従来の炉では、燃焼にともなう出力密度ピーキングファクターや反応度出力係数の変化といったものに、大きな安全ファクターを掛けたりして十分な注意を払う必要があった。CANDLE ではこのような考慮が小さくなる。

3) オリフィスによる燃焼に伴う流量調整の必要がない。

一般の原子炉では燃焼に伴って軸と垂直な平面での出力分布も変化する。このため燃焼開始時に冷却材（軸と平行に流す）出口温度を一定になるように冷却材流量を調節しておいても、燃焼が進むとともに違いが大きくなっていく。あまり大きくなるようだと、炉心冷却材チャンネルの冷却材流量を再調整することになる。CANDLE 燃焼では、軸と垂

直な平面での軸方向積分出力分布は燃焼とともに変化しないので、燃焼にしたがって流量調整を行う必要がなく、運転が容易となり運転ミスを少なくすることができる。

4) 半径方向出力分布の最適化に優れる。

すでに述べたごとく、今までの炉では、燃焼とともに出力分布が複雑に変化するので、ある時点で最適化されていた分布も、異なる時点では最適なものからかなり外れた分布になることがある。このため寿命全体を考え、全体として最適化する必要がある。CANDLE では一旦最適化されると寿命全体に亘って最適であり、高度で確実な最適化が図れる。

5) 炉心の高さを大きくすることにより、原子炉の寿命を簡単に長くできる。

燃焼度に制限がある場合、原子炉の寿命を長くするには、出力密度を低くすることによって行っている。この場合、全出力を変えずに寿命をM倍にするには、体積をM倍にすることになる。CANDLE も長寿命にするときには、炉心高さを大きくするわけだから、体積を大きくすることになる。元の設計で燃焼領域の動く距離をDとすると、寿命をM倍にするためには炉心高さを $(M-1) \times D$ だけ足してやればよいことになる。即ち、出力密度方式では掛け算になるところが、CANDLE 方式では足し算になるのである。このため一般的に CANDLE 方式は出力密度方式に比べ体積増加が少ない。この効果はMが大きくなるほど大きくなる。Dが大きければ CANDLE 方式でも大きくなると考えられるが、一般にDは極めて小さい。これを前提とした上で、以下に特長を示しておく。

- 燃焼領域の移動速度は一般に極めて遅い。このため超長寿命炉の設計が容易である。
- 炉心高さを変えることにより、炉心寿命を簡単に変更できる。
- 小型長寿命炉が可能となった場合、原子炉を工場で作り、サイトに運搬して据え付け、そこで燃料交換無しに長期運転した後、再び工場に戻す（新しい原子炉と取り替える）といったことが可能となる。このためさらに次のような特長を期待できる：
 - ・燃料交換は通常作業で最も難しいものであり、高度な技術を期待できないような場所で使用する場合、燃料交換を必要としないことは大きな利点となる。
 - ・燃料を炉心に閉じ込めたままの原子炉は核拡散抵抗性も高い。

6) 取替炉心新燃料の無限体系中中性子増倍係数が1以下となる。

図5に示したように、新燃料の無限体系中中性子増倍係数は1以下である。ところで新燃料の無限体系中中性子増倍係数が1以下というのは安全上極めて望ましいことである。このため新燃料をたくさん集めても臨界になる可能性が小さく、新燃料の輸送や貯蔵が簡単に安全になる。

1) 軸方向に長い炉心になりやすく、冷却材の圧力損失が大きくなりやすい。

長寿命にしようと思えば、軸方向に長くすればよいが、軸方向に長くすれば、それだけ冷却材の流路が長くなるので圧力損失が大きくなり、ポンプを強力にする必要が生じる。

但し、極端な長寿命でなければ問題とならない。また燃焼領域の移動速度が非常に遅ければ、それほど長い炉心にしなくてもかなりの長寿命を達成することができる。例え

ば大型高速炉での移動速度は、典型的には4 cm/y 程度である。1 年間にわずか4 cm しか進まないから10 年間で40cm、20 年間で80cm であり、通常のポンプでも圧力損失の増加の影響をあまり受けない範囲である。

2) 軸方向出力分布の調整の自由度が少ない。

軸方向はCANDLE 固有の分布になってしまう。ただし、半径方向の出力分布は特長の4) で述べたように、高度に最適化できるので、総合的に考えると、全体的な出力分布はかなり良い分布になっていると考えられる。

3) 初期炉心の構成が困難である。

既に述べたように、我々の研究で、濃縮ウランと天然に存在する元素だけで、余剰反応度変化が極めて少ない第1 炉心を構成することが可能になっている。

(I I – A) 天然ウラン（または劣化ウラン）装荷型 CANDLE 高速炉の特長

1) 最初の炉以外には核分裂性燃料を必要としないような設計が可能となる。

従って、第2 炉心以降の燃料は天然ウランまたは劣化ウランだけでよい。即ち、第1 炉心の核分裂性物質があれば、濃縮施設や再処理施設を必要としない。言うまでも無いが、これらの施設に伴う廃棄物も無くなる。

2) この炉における使用済み燃料の燃焼度は40%程度になる。

- この値は現在世界で計画されている代表的な高速炉+再処理システム（70%）に匹敵する。
- 天然ウラン資源の40%が濃縮も再処理もせずにエネルギーに変換できるわけである。
- 単純なワンスルーサイクルを考えても、現在の軽水炉（4%燃焼度：元の天然ウランの0.72%に対応）に比べて、資源量は60 倍になり、地層処分用廃棄物は1/10 になる。雑廃棄物は極端に少なくなる。
- 現在濃縮施設に残っている劣化ウランの利用については少し詳しく説明する必要があるが、3.4 で改めて説明する。

3) 燃焼速度は4 cm/年程度であり、超長寿命炉の設計が容易。

この場合、炉心寿命を20 年あるいは30 年としても炉心高さをそれぞれ0.8m あるいは1.2m 増やすだけである。

4) CDA が発生したとしても再臨界事故になりにくい。

余剰反応度制御のための吸収材や反射体がなく、炉心に余剰反応度を確保するための余分の核分裂性物質が無いため、炉心が壊れて燃料の再配置が起こったとしても再臨界事故が発生しにくい。（ I I – B) 天然ウラン（または劣化ウラン）装荷型 CANDLE 高速

炉の問題点

1) 優れた中性子経済を得るための設計が必要である。

重要な課題であるが、多くの解決法が考えられる。我々は既に多くの設計例を示している。

2) 高燃焼に伴う材料健全性を保証する必要がある。

現状の材料では高温で 40%の燃焼度に耐える燃料は無理と考えられている。かなりの研究開発が必要であろう。燃料そのものの開発も必要であるが、大きな高速中性子フルエンス（高速中性子照射量）に耐える被覆材の開発が重要である。

また高燃焼度に伴い核分裂生成物の蓄積量が極めて大きくなる。これも重要な問題となる。

材料開発には長期の研究期間を必要とする。完璧な材料を開発する前に、揮発性の核分裂生成物を逃がし、被覆材を新しくするだけの簡易再処理を取り入れる方法で、これらの問題を解決するのが得策であろう。

簡易再処理に関しては既に韓国とカナダによる DUPIC と呼ばれる簡易再処理が開発されている。これを用いた場合の CANDLE 燃焼に与える影響については既にいくつかの場合について研究を進めているが、有意な変更を与えないことがわかった。

3. 軽水炉後の CANDLE 炉利用のシナリオ

現在世界で利用されている原子力発電所の殆どは軽水炉を利用している。軽水炉の燃料は微濃縮ウランであるが、この場合濃縮過程において、元の天然ウランの 87%は劣化ウランとして使用されずに残されることとなる。

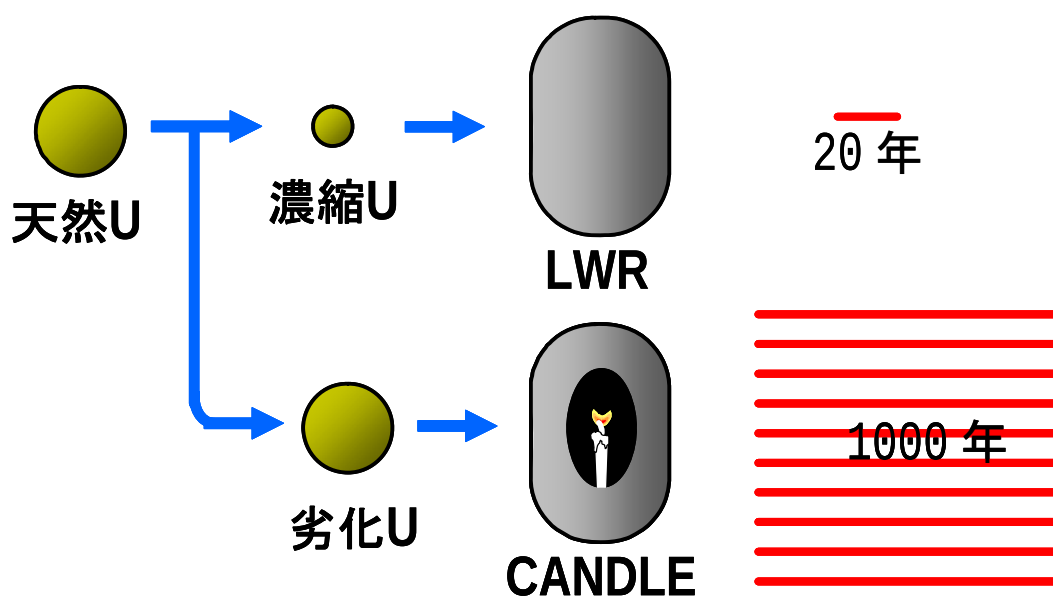


図 3 軽水炉後の CANDLE 炉利用シナリオ

これを CANDLE 炉の燃料として利用することになると、CANDLE 炉では劣化ウランの約 40%を燃焼することから、CANDLE 炉は元の天然ウランの $35\%(=0.87 \times 0.4)$ を利用することとなる。軽水炉では天然ウランの 0.7%しか利用しなかったわけであるから、もし軽水炉で X Joules のエネルギーを産み出したとすると、それに伴って発生した劣化ウランを使って CANDLE 炉は $50(=35/0.7)X$ Joules を産み出すことになる。別の言い方をすると、軽水炉を Y 年運転したとすると、そこで残った劣化ウランを使って $50Y$ 年更に運転できることになる。 Y 年を 40 年としても $50Y$ 年は 2000 年であり、人類の発展にとって充分長い期間を意味する。

3. 研究の現状

高速炉の概念設計を行い、CANDLE 燃焼が可能な炉心を見出した。これらの性質は 2. で示したようなものであるが、詳しい設計を参考文献に示す。学術文献を選んでいるのでいずれも英文となってしまうので、[1]に和文の小冊子を挙げておいた。

現在、高速炉だけでなく高温ガス炉等でも CANDLE 燃焼が成立することを示している。但し、この場合、高速炉のように天然ウランの有効利用はできない。初期炉心を見出すことは成功している。燃焼途中で被覆材を交換しても燃焼特性に悪影響を及ぼさないことを示している。計算法を高精度化し、いくつかの近似について問題が無いことを示している。

4. 目標と課題

最終的な目標は 2. で示した優れた特長を有する CANDLE 燃焼高速炉の実現である。これにより、次に示すように、格段に簡単で安全な原子炉を用い、資源、安全、廃棄物、核拡散の問題を同時に画期的に緩和する原子炉を実現することになる。

1) 持続的発展に関して：

ウラン資源を現在の軽水炉の 50 倍も有効に使える。

軽水炉が濃縮工場に残した劣化ウランが使える。もし軽水炉で 40 年分のエネルギーを発生していたとすると、2000 年分のエネルギーをこの劣化ウランで発生させることができる。

2) 安全性の問題に関して：

現在の原子炉は複雑である。特に燃焼に関して、原子炉の特性が変化し、良く訓練された運転員が運転管理する必要がある。

今までの重大な事故は運転員のミスや誤解から発生している。シンプルな原子炉はこのような原因の多くを取り除く。

[illegible]

大学としてはCANDLE炉、CANDLE試験炉いずれについても、概念設計までは主体的に行うが、それ以降は国または民間の適当な機関に活動を移し、それに対して協力することにより参加する。

参考文献：

- [1] 関本博、「蠟燭に灯を点せ」COE-INES、東工大(2004).
- [2] Sekimoto, H. *Light a CANDLE*, COE-INES, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2005.
- [3] Okumura, K., et al., "SRAC95; General Purpose Neutronics Code System," *JAERI-Data/Code 96-015*, 1996, Japan Atomic Energy Research Institute, Japan.
- [4] Sekimoto, H.; Ryu, K. "A New Reactor Burnup Concept CANDLE," *Proc of PHYSOR 2000 Pittsburgh* May 7-11, 2000.
- [5] Sekimoto, H. & Ryu, K., "Feasibility Study on the CANDLE New Burnup Strategy," *Trans. American Nuclear Society*, 2000, Vol. 82, pp 207-208.
- [6] Sekimoto, H. & Ryu, K., "A Long Life Lead-Bismuth Cooled Reactor with CANDLE Burnup," *Proc of ICENES 2000*, Sept. 24-28, 2000, Petten, The Netherlands, pp 198-206.
- [7] Sekimoto, H. & Ryu, K., "Demonstrating the Feasibility of the CANDLE Burnup Scheme for Fast Reactors," *Trans. American Nuclear Society*, 2000, Vol. 83, p. 45 (CD).
- [8] Sekimoto, H.; Ryu, K. & Yoshimura, Y. "CANDLE: The New Burnup Strategy," *Nucl. Sci. Engin.*, 2001; Vol. 139, pp 306-317.
- [9] Sekimoto, H., Toshinsky, V. & Ryu, K., "Natural Uranium Utilization without Enrichment and Reprocessing," *Proc of GLOBAL 2001*, September 9-13, 2001, Paris, France (CD).
- [10] Sekimoto, H., "Applications of "CANDLE" Burnup Strategy to Several Reactors," *Proc. of ARWIF-2001*, October 22-24, 2001, Chester, UK (CD).

- [11] Sekimoto, H. & Tanaka, K., "CANDLE Burnup for Different Core Designs," *Proc. of PHYSOR2002*, October 7-10, 2002, Seoul, Korea (CD).
- [12] Sekimoto, H. & Tanaka, K. "Application of CANDLE Burnup Strategy to Small Reactors," *Trans. American Nuclear Society*, 2002, Vol. 87 (CD).
- [13] Takada, T., Udagawa, Y. & Sekimoto, H., "Simulation Study on CANDLE Burnup Applied to an LBE-Cooled Metallic Fuel Fast Reactor," *Proc. of GENES4/ANP2003*, September 15-19, 2003, Kyoto, Japan (CD).
- [14] Sekimoto, H., "Contribution of CANDLE Burnup to Future Equilibrium Nuclear Energy Utilization," *Proc. of GLOBAL 2003*, November 16-20, 2003, New Orleans, Louisiana, USA (CD).
- [15] Sekimoto, H., Takada, T. & Udagawa, Y., "Startup of CANDLE Burnup in an LBE-Cooled Metallic Fuel Fast Reactor," *Proc. of GLOBAL 2003*, November 16-20, 2003, New Orleans, Louisiana, USA (CD).
- [16] Ohoka, Y. & Sekimoto, H., "Application of CANDLE Burnup to Block-Type High Temperature Gas Cooled Reactor," *Proc. of ICON11*, April 20-23, 2003, Tokyo, Japan (CD).
- [17] Sekimoto, H. & Ohoka, Y., "Application of CANDLE Burnup to Block-Fuel High Temperature Gas Reactor," *Proc. of ICAPP'03*, May 4-7, 2003, Cordoba, Spain (CD).
- [18] Ohoka, Y. & Sekimoto, H., "Application of CANDLE Burnup to Block-Type High Temperature Gas Cooled Reactor for Incinerating Weapon Grade Plutonium," *Proc. of GENES4/ANP2003*, September 15-19, 2003, Kyoto, JAPAN (CD).
- [19] Greenspan, E., Hejzlar, P., Sekimoto, H., Toshinsky, G. & Wade, D., "New Fuel Cycle and Fuel Management Options in Heavy Liquid Metal-Cooled Reactors," *Nucl. Technol.*, 2003, Vol. 151, pp 177-191.
- [20] Sekimoto, H., "Application of "CANDLE" Burnup to Small Fast Reactor," *Proc. of 5th Int. Conf. on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids*, May 16-20, 2004, Dubrovnik,

Croatia (CD).

[21] Sekimoto, H., "Effect of Neutron Spectra and Fuel Burnup on CANDLE Calculation," *Trans.*

American Nuclear Society, 2004, Vol. 92 (CD).

[22] Ohoka, Y. & Sekimoto, H., "Application of CANDLE Burnup to Block-type High Temperature Gas Cooled Reactor," *Nucl. Engin. and Design*, 2004, Vol. 229, pp. 15-23.

[23] Sekimoto, H. & Ohoka, Y., "Burnup and Temperature Effects on CANDLE Burnup of Block-Type High Temperature Gas Cooled Reactor," *Proc. of ICON12*, April 25-29, 2004, Arlington, Virginia, USA (CD).

[24] Ohoka, Y., Ismail & Sekimoto, H. "Effects of Burnup and Temperature Distributions to CANDLE Burnup of Block-Type High Temperature Gas Cooled Reactor," *Proc. of ICAPP '04*, June 13-17, 2004, Pittsburgh, PA, USA (CD).

[25] Ohoka, Y. & Sekimoto, H., "Simulation Study on CANDLE Burnup of High Temperature Gas Reactor," *Trans. American Nuclear Society*, 2004, Vol. 92 (CD).

[26] Sekimoto, H., "Application of "CANDLE" Burnup to LBE Cooled Fast Reactor," *IAEA-TECDOC-1451*, 2005, pp 203-212.

[27] Sekimoto, H., "Application of CANDLE Burnup Strategy for Future Nuclear Energy Utilization," *Progress in Nucl. Energy*, 2005, Vol. 47, pp 91-98.

[28] Ohoka, Y., Sekimoto, H. & Watanabe, T., Liem P H., S. Wakana, Ismail, "Neutronic Characteristics of CANDLE Burnup Applied to Block-Type High Temperature Gas Cooled Reactor, " *Proc. of ICAPP '05*, May 15-19, 2005, Seoul, KOREA (CD).

[29] Sekimoto, H. & Udagawa, Y., "Shut-down and Restart Simulation of CANDLE Fast Reactors," *Trans. American Nuclear Society*, 2005, Vol. 93 (CD).

[30] Ohoka, Y, Watanabe, T. & Sekimoto, H., "Simulation Study on CANDLE Burnup Applied To

Block-Type High Temperature Gas Cooled Reactor ,” *Progress in Nucl. Energy*, 2005, Vol. 47, pp 292-299.

[31] Sekimoto, H., “Fuel-cycle of CANDLE Burnup with Depleted Uranium,” *Proc. of ICAPP’06*, June 4-8 2006, Reno, Nevada, USA (CD).

[32] Sekimoto, H. & Udagawa, Y., “Effects of Fuel and Coolant Temperatures and Neutron Fluence on CANDLE Burnup Calculation,” *J. of Nucl. Sci. Technol.*, 2006, Vol. 43, pp 189-197.

[33] Sekimoto, H. & Miyashita, S., “Startup of “Candle” Burnup in Fast Reactor from Enriched Uranium Core,” *Energy Conv. Manag.*, 2006, Vol. 47, pp. 2772-2780.