

蠟燭に灯を点せ

CANDLE

原子炉の新しい燃焼法

固有安全、核拡散抵抗性、燃料サイクル革命をめざして

(改訂版)

東京工業大学
原子炉工学研究所
関本 博

與其詛咒黑暗
不如點亮蠟燭
中國諺語



CANDLE

Better to light a candle than curse the darkness

<http://www.nr.titech.ac.jp/coe21/eng/link/index.html>

改訂版序

平成15年度に原子力基礎研究制度のサポートを得て、本書の初版を出版した。これは理科系の大学生なら読めるようにしたいと考えていたのであるが、我が研究室に入ってきた大学院生の殆どが本書を理解できなかった。

彼らは原子炉の中では核分裂が起こっており、このエネルギーを我々が利用している程度のこととは知っている。中性子による核分裂の連鎖反応がどういうものかということも大概が知っている。しかし臨界の意味になると少しあやしくなり、燃料が燃焼することになると殆どの者がとまどってしまうのである。

ここがわからないと本書を理解できないし、CANDLE 燃焼の意味はわからない。このようなことから本書を書き改めることとした。

幸い初版はほとんどを原子力関係者に配布したので、配布した人なら理解していただけたであろうと思っている。

また CANDLE 燃焼は現在研究が進行中のものである。このため初版以降に得られた知見もできるかぎり盛り込むことにした。

はじめに

この世はうまく創られている。科学の進展とともに、「うまく」という内容もより深く理解されるようになり、しかも人間にとってうまくできているということがわかってきた。核分裂もそのひとつである。核分裂で生まれた中性子のひとつは次の核分裂を引き起こすために使われ、他のひとつは無くなった核分裂性物質の補給にあてられる。残りはごく僅か。これをどのように利用するか？この世の創造主は我々に極めて興味深い問題を提供し、どのような解答を出すのだろうかと見ているような気がする。CANDLE はそのような解答のひとつである。

CANDLE というのは原子炉の新しい燃焼法であり、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、燃焼に伴い燃焼領域は、核種数密度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。このため反応度も炉特性もまったく変化しない。ここで重要なのは、燃料は従来の設計と同じように固定されたままであるにもかかわらず、制御棒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。安全はもとより安心を与える原子炉と言えるであろう。

CANDLE 燃焼ではこの他にも色々な画期的な特長があるが、中性子経済に優れる高速炉に適用すると特に優れた特長が現れる。新燃料として天然ウランや劣化ウランの使用が可能になり、しかもこれらの約 40%が燃える。我々は既に大量の劣化ウランを保有しているが、これを用いれば、ウラン採鉱も濃縮施設も再処理施設も無しに、何百年も原子力を利用し続けられることになる。また燃焼度が高い分、使用済み燃料の量も少なく、ワンスルーと呼ばれる簡単な燃料サイクルを用いることができる。

中性子経済に優れる高速炉への適用は大きなメリットをもたらすが、材料開発等を含む多くの技術開発を必要とする。既に述べたとおり、CANDLE 燃焼はこれ以外にも多くの特長を有している。高速炉への本燃焼法の適用は技術的に困難に見えるかもしれないが、原研で開発中の HTTR のようなブロック燃料を用いた高温ガス炉なら殆ど技術開発無しに適用することが可能で

ある。本書では、具体的な例として、高温ガス炉と中性子経済に優れる高速炉への適用について説明する。

CANDLE 燃焼を知ったらどのように思われるか知りたくなって、面識はまるでなかったのであるが、固有安全炉の開発を促進しようとされていた Weinberg 博士に論文を送ったことがある。興味を示していただき、似た燃焼法を発表していた Teller 博士(送った論文で引用していた*; 水爆の父としてよく知られている)に電話されたそうである。Teller 博士の話は要領を得なかったようであるが、筆者の論文の内容はよく理解していただけたようで、期待しているとお返事をもらった。Teller 博士の死亡記事が新聞に出たのはそれからしばらくしてからであった。彼なら CANDLE 燃焼をどのように考えたか知りたかったところである。

アメリカの前NRC委員長のMeserve氏が原子力の現状についての講演のおり、暗い現状を明るくするために、中国の諺を引用し、「Better to light a candle than curse the darkness」と語ったのを思い出し、本書のタイトルを「蠟燭に灯を点せ」にした。本書が原子力の明るい未来に少しでも寄与できればと願っている。

気軽に読んでいただけるように、本書では厳密な議論を避けるようにした。このため、専門家にはかえって解りにくくなったところも多かろうが、ご容赦願いたい。興味を持たれた専門家は参考文献にあたってくださいようお願いしたい。CANDLE 燃焼に関する論文は多数書かれているが、いずれも一般向けではない。このため参考文献は少なくした。数式もなるべく使わないようにしたが、解析法の説明では使わざるを得なかった。微分方程式を使用した、原子炉理論では最も基礎の方程式であり、少し学んだ人なら誰でも知っているはずのものである。但し、式の苦手な読者はこの章を飛ばしていただいても他の部分は理解できるように書いたつもりである。

* Teller 博士の提案は真中に中性子源を置き(運転初期に必要なだけで、後はいらない)、その両側にトリウムを置くと、トリウムは核分裂性物質である U_{233} に変化し、燃焼領域は自立的に中心から両端に向かって移動していくというもので、CANDLE 燃焼とよく似ている[1]。しかし著者らはトリウムで CANDLE 燃焼を実現することはできなかった。Teller 博士の場合、幾何学的に厳密な意味で CANDLE になっていないため、燃焼に伴って中性子の漏れが少なくなるように燃焼領域の形状が変化していくとか、制御に使っているリチウムが実質的に燃焼反応度制御まで行っているのではないかと推察される。

目 次

はじめに	i
1. 余剰中性子	1
1.1. 不安定の方が安定?	1
1.2. 核分裂	2
1.3. 連鎖反応と臨界制御	4
1.4. 燃焼と燃焼制御	5
1.5. 余剰中性子の利用	6
2. CANDLE 燃焼とは	9
2.1. 燃焼法の概念	9
2.2. 燃焼方式の特長と問題点	12
3. 数学的説明と解析方法	17
4. ブロック燃料型高温ガス炉	20
4.1. 原理	20
4.2. 特長	22
4.3. 解析結果	26
5. 天然ウラン(または劣化ウラン)装荷型高速炉	25
5.1. 原理	25
5.2. 解析結果	26
5.3. 特長と問題点	27
6. 追加	30

6.1. 初期炉心問題	30
6.2. 高燃焼問題	32
7. まとめ	33
参考文献	35
専門用語	36
おわりに	41

1. 余剰中性子

1.1. 不安定の方が安定？

まだ学生だったころ、プラスとマイナスに分かれた状態より、中性の状態の方が安定であると思いを込めていた。このため陽子と電子の質量を足したものより中性子の質量の方が大きいということを学んだとき、違和感を持った。しかしこの中性子の不安定こそが我々が宇宙に存在するためには不可欠であることに思い至って、自然の仕組みに感激したものである。中性子は重い正の電化を持った陽子と軽い負の電荷を持った電子に壊れる。いわゆる β 崩壊である。中性子は単独では短時間しか存在できないが、陽子と結合すると安定に存在することも可能である。適当な数の陽子と中性子が結合し、正の電荷を持った原子核を構成する。この周りを負の電荷を持った軽い電子が回っているというのが原子のイメージである。電子はひとつの原子核の周りを回っているのが必ずしも最も安定な状態ではなく、この不安定さが分子の形成に繋がり、更には高分子の形成を経て生命体を生み出し、人類が存在するようになったというわけである。

ここで更に興味深いのは、中性子の質量は陽子と電子の質量の和より大きいけれども 0.08% だけであり、このため中性子は 10.4 分の半減期を持つことになったということである。宇宙がビッグバンで始まったとき、陽子と中性子はほぼ同数生まれたとされている。しかし中性子は陽子に変換していく。この半減期は中性子が消滅する前に陽子と結合し、重陽子を生み出し、さらにこれらの粒子が結合してヘリウムを生み出すのに適当な長さであった。もし中性子の半減期がこれより短かったら、ヘリウムは殆ど生まれず、これよりさらに重い原子も出来ず、従って複雑な分子からなる知的生命体は誕生しなかったであろうといわれている。反対に、この半減期がこれより長く、もっと安定な場合には、中性子星が生まれやすくなって輝く太陽は無くなり、これまた知的生命体が誕生するには困難な状態になったことであろう。

知的生命体が宇宙に誕生するために許される中性子の不安定さの許容範囲は極めて小さい。そのような値がどのようなメカニズムによって選ばれたのか、さらに基礎的な法則や定数を使って説明できるかもしれない。しかしそれではその基礎的と考える法則や定数がどうして選ばれたのかという終わりのない繰り返し問題の循環に陥ってしまいそうである。このような状況では、中性子の適度の不安定性は神が選んだのだと答えたとしても仕方がないのかもしれない。中性子の不安定さはこのように絶妙のものである。

1.2. 核分裂

原子核は既に述べたように陽子と中性子からできている。このことから陽子と中性子は核子と呼ばれる。軽い原子核では陽子と中性子の対称性がよく、構成する陽子と中性子の数はほぼ等しい。しかし原子核が大きくなるにつれ陽子の正の電荷による電氣的反発力が原子核を不安定にするため、陽子に比べて中性子の数の多い原子核の方が安定となる。現在地球上に存在する最も大きな原子核はウラン ^{238}U (と書く) であるが、この原子核では陽子が 92 個であるのに対し、中性子は 146 個もある。

原子核同士の反応を核反応といっているが、これは極めて起こりにくい。その大きな理由は原子核が正の電荷をもっていて、電氣的な反発力が大きく、お互いに近づくのが困難だからである。中性子は電荷をもたないので容易に核反応を起こすことができる。しかも量子効果で低いエネルギーの方が反応を起こしやすい。原子核に低エネルギーの中性子を当てると、一般的には中性子の吸収が起こる。このとき、原子核は結合のためのエネルギーがより少なくて済むようになるので、余分のエネルギーが原子核の内部運動エネルギーとなり、原子核を不安定にする。この余分のエネルギーは、一般的にはやがて高エネルギー電磁波 (γ 線) として放出され、原子核は安定となる。ところがウラン ^{235}U (と書く) に中性子を当てると中性子を吸収した原子核はやはり大量の余分のエネルギーを持つようになるが、多くの核子からできているため、あたかも液滴のように振動を始め、やがてかなり高い確率で2つの同じくらいの大きさの原子核に壊れてしまう。これを核分裂と呼び、生まれてくる2つの原子核を核分裂生成物と呼んでいる。

原子炉では中性子のエネルギーを低くするために、中性子を軽い原子核に衝突させる。何度も衝突させることにより、中性子はどんどん減速されていくが、この場合に行き着く最終的な中性子のエネルギーは衝突相手の運動エネルギー、即ち媒質の熱運動のエネルギーである。このため、このような減速されきった中性子を熱中性子と呼んでいる。熱中性子を ^{235}U にあてると核分裂を起こすが、 ^{238}U では起こさない。これは原子核の中にある中性子や陽子はその数がそれぞれ偶数の方が奇数より安定しているという性質から説明される。即ち ^{235}U の場合は中性子の数が 143 と奇数であり、中性子を吸収するとこれが 144 と偶数になる。他方 ^{238}U ではこれが偶数から奇数となる。中性子吸収により原子核は余分のエネルギーを持つと述べたが、この余分のエネルギーが ^{235}U が中性子を吸収した時の方が ^{238}U が吸収した時より大きくなる。このため ^{235}U では核分裂が生じるのに ^{238}U では生じないのである。熱中性子を吸収して核分裂を引き起こす物

質を核分裂性物質、引き起こさないで核分裂性物質になる核種を親物質と呼んでいる。

軽い原子核に比べ重い原子核には多くの中性子が含まれていると先に述べた。核分裂では重い原子核が約半分の重さの原子核に変換するわけである。このため安定な原子核を考えると中性子が余分になり、1回の核分裂当り、一般に2ないし3個の中性子が放出される。この数が本書で極めて重要な数となる。この数は安定な原子核に含まれる中性子の数から予想されるものより少ないが、これは、余分の中性子は全て放出されるのではなく、かなりの部分は核分裂生成物の中に閉じ込められているためである。このような原子核は不安定でやがて余分の中性子を陽子に崩壊させることにより安定化する。ここでほんの少しの原子核は中性子を放出して安定化することを付け加えておく。このとき放出される中性子は遅発中性子と呼ばれ原子炉の運転で重要な役割を果たすのだが、ここでの説明は省略する。

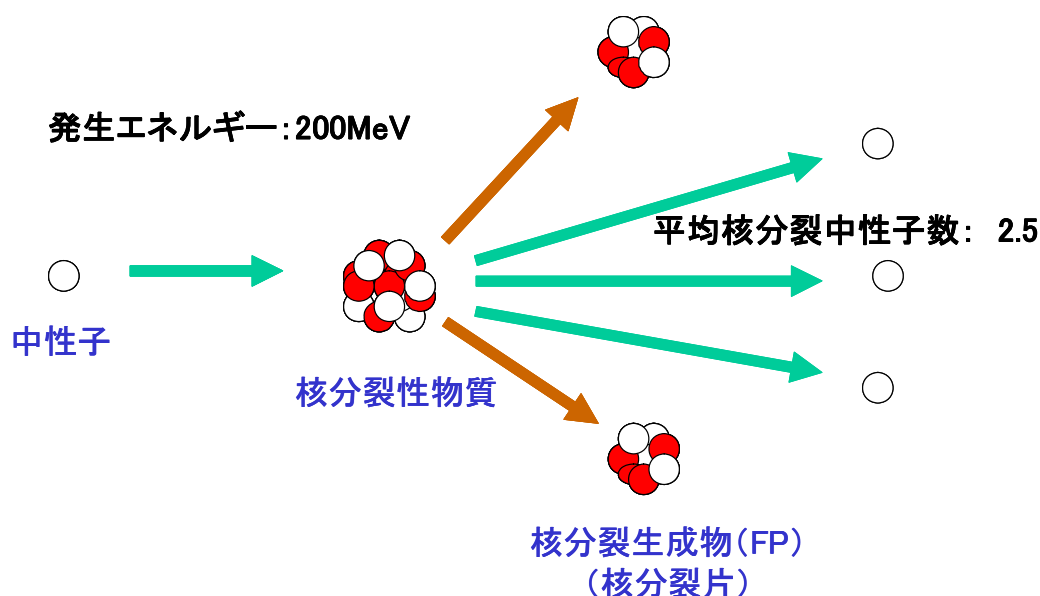


図1 核分裂の性質

安定な原子核にも当然安定度の高いものと低いものがある。安定度のピークは鉄のあたりにあり、それより重くても、軽くてもより不安定になっていく。ウランは重い方の端にあり、既に不安定で、非常にゆっくりと α 粒子を放出して、もっと軽い原子核に変わっていく。核分裂は非常に不安定な原子核が非常に安定な原子核にいきよに変換されることを意味する。不安定な状態が安定な状態に変化するとき、エネルギーが放出される。1回の核分裂で放出されるエネルギーは約 200MeV である。ここで MeV は 10^6eV を意味する。化石燃料等の燃焼は化学反応であるが、化学反応 1 回当たりの発熱量が eV の単位で測られることと比較すると、核分裂での発熱量が極

めて大きいことがわかる。

ここで整理の意味で核分裂の性質を図1にまとめておく。

1.3 連鎖反応と臨界制御

核分裂性物質は中性子を吸収するとかなり高い割合で核分裂し、その際2ないし3個の中性子を放出すると述べた。これは新たに生まれた中性子が次の核分裂を引き起こす可能性を示している。図2に示すように、新たに生まれた中性子が次の核分裂を引き起こすことによって、核分裂が次々に引き起こされていく反応を連鎖反応とよんでいる。

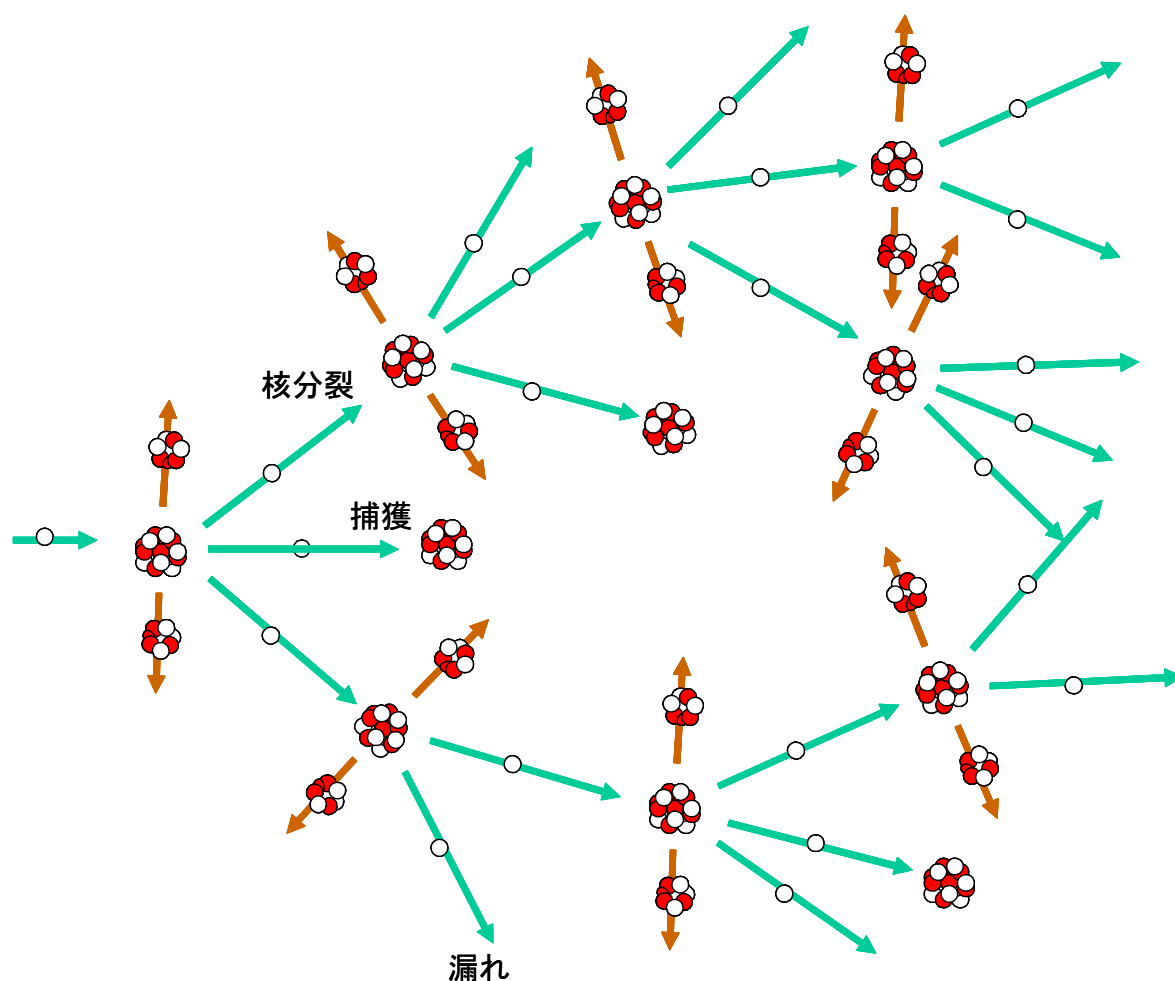


図2 核分裂連鎖反応

中性子の数は時間と共に増えていくことも減っていくこともある。また変化しないこともある。このような性質は原子炉を考えると、極めて重要であるが次に述べる中性子増倍係数の値を求

めることにより評価できる。核分裂連鎖反応を考えると、ある核分裂から次の核分裂までを中性子の1世代と数える。中性子増倍係数はある世代の中性子数を1世代前の中性子数で割ったものとして定義される。即ち

$$\text{中性子増倍係数} = \frac{\text{ある世代の中性子数}}{\text{1世代前の中性子数}}$$

である。この値が1に等しいとき、中性子の数は時間と共に変化しないわけで、これを臨界と呼ぶ。またこの値が1より大きいとき、中性子の数は時間と共に増加していくが、これを超臨界と呼び、1より小さいとき、中性子の数は時間と共に減少していくが、これを未臨界と呼ぶ。

一定の出力で運転中の原子炉においては、中性子の数は一定であり、中性子増倍係数は1になっている。運転を停止するときには中性子増倍係数を1より充分小さな値になるようにする。これには中性子吸収材を炉心(原子炉の燃料領域)に挿入してやればよい。このようにすれば核分裂で生まれた中性子が次ぎの核分裂を引き起こすまでに、この中性子吸収材に吸収されてしまい、中性子増倍係数が1以下となる。中性子吸収材は棒の形になっているのが普通で、この場合、制御棒と呼ばれる。運転状況によって中性子増倍係数の値は変化しようとする。例えば炉心の温度が変化しただけでも値が変わる。温度が上がると中性子増倍係数も大きくなるようだといへんである。この場合、最初丁度臨界で中性子増倍係数が1であっても、核分裂数が増えて温度が上がると中性子増倍係数は1以上になり、核分裂数はもっと増える。すると温度はますます上がり、それが核分裂数を増やすという悪循環に陥り、原子炉は暴走してしまう。原子炉を設計する場合、温度が上がれば中性子増倍係数は小さくなるようにしておかなければならない。このように設計されておれば、中性子増倍係数が1以上になって、核分裂が増え、温度が上がっても、中性子増倍係数は小さい方向に変化し、やがて1に収束する。すなわちこのように設計しておいてやれば、原子炉は温度変化を伴う外乱に対し、常にその影響を無くす方向に変化し、運転は安定する。

1.4. 燃焼と燃焼制御

火力発電所に比べ原子炉はエネルギーセキュリティが高いといったことが言われる。これは火力発電所では大量の燃料を連続的に炉に入れていかなければならないのに、原子炉ではいったん入れた燃料は数年間原子炉の中に入れっぱなしにしておけるようなことから、なんらかの理

由で燃料の供給が止まったとしても問題は無いといった意味で使われている。

火力発電等とのアナロジーで原子炉においても燃料が核分裂をして消費されていくことを燃焼とよんでいる。ここではこの燃焼について少し考えてみる。

臨界にある原子炉で燃焼が進むとどうなるであろうか。現在一般に運転されている軽水炉等では、核分裂性物質は減少し、核分裂生成物が蓄積してくる。最初は臨界にしてあるから中性子増倍係数は1である。しかしその後の変化で1以下になってしまう。何もしなければ、燃焼と同時に未臨界になってしまうことになる。この問題を解決するために一般には次のような方法が採られている。最初に余分の中性子吸収材を入れておく。燃焼とともに燃料の成分が変化することによって減少する中性子増倍係数が1に戻るよう、この吸収材を減少させるのである。減少させる方法は、前節の原子炉の運転で述べたような運転員が中性子吸収材を引き抜く方法以外に、燃焼に伴う吸収材の変化を利用することもある。この場合、中性子を吸収することにより中性子吸収効果の少ない物質へ転換されるように中性子吸収材が選ばれるが、転換速度の調節が重要な設計課題となる。この場合の吸収材を可燃性毒物と呼んでいる。可燃性毒物だけではいつも原子炉を丁度臨界にしておくことは困難で、人為的な制御機構をさらに加える必要がある。ただし、可燃性毒物を使うことにより人為的な制御機構への負担は大幅に軽減できる。

1.5. 余剰中性子の利用

自然界に存在する核分裂性物質は ^{235}U だけである。しかもこの半減期は ^{238}U の半減期より短く、超新星爆発で生成されてから地球の年齢と同じ位たった現在では、天然ウランに占める割合はわずか0.7%にすぎない。残りは ^{238}U である。これでは核分裂で生まれた中性子は ^{238}U に吸収されてしまい、連鎖反応を維持できない。ところが熱中性子に対しては ^{235}U の反応率が ^{238}U の反応率より極端に大きくなる。この性質を利用して、フェルミは純粋な黒鉛に天然ウランを非均質構造にして混ぜ、中性子をうまく減速することにより最初の原子炉を作るのに成功した。中性子の漏れを少なくするため、集合体はずいぶん巨大なものになってしまったが、この大きさこそは、臨界の達成がいかに難しいかということを示すものであり、中性子バランスに関して、それを利用しようとする者に示された、問題の困難さを示すものといえるであろう。太古の昔、 ^{235}U の自然崩壊がそれほど進んでおらず、天然ウランに占める割合がもっと大きかったとき、水と混ざって、天然の原子炉が出来たことはよく知られている。今では高い知能を持った生物の介入を経て初めて原子炉が完成することになった。 ^{235}U を濃縮すれば臨界の達成は容易になる。しかしこれだけで

は ^{235}U だけしか利用できないといってよい。工夫すべきは中性子の利用である。

核分裂で生まれる中性子の数は2ないし3個程度であると述べた。しかし核分裂性核種といえども中性子を吸収すれば常に核分裂をするわけではない。中性子を捕獲したまま重い原子核に留まる場合もある。このため臨界性や中性子の有効利用を議論する場合は核分裂当りの発生中性子数ではなく、中性子吸収反応当りの発生中性子数の方が適切である。この値は η (ギリシャ文字でエータと読む) 値と呼ばれている。 η 値は核種によっても吸収される中性子のエネルギーによっても変化するが、これを図3に示しておく。 ^{235}U よりもプルトニウム ^{239}Pu の方が大きな値を示し、中性子のエネルギーに関しては 10keV あたりからエネルギーの増加に伴って急激に増大しているのがわかる。

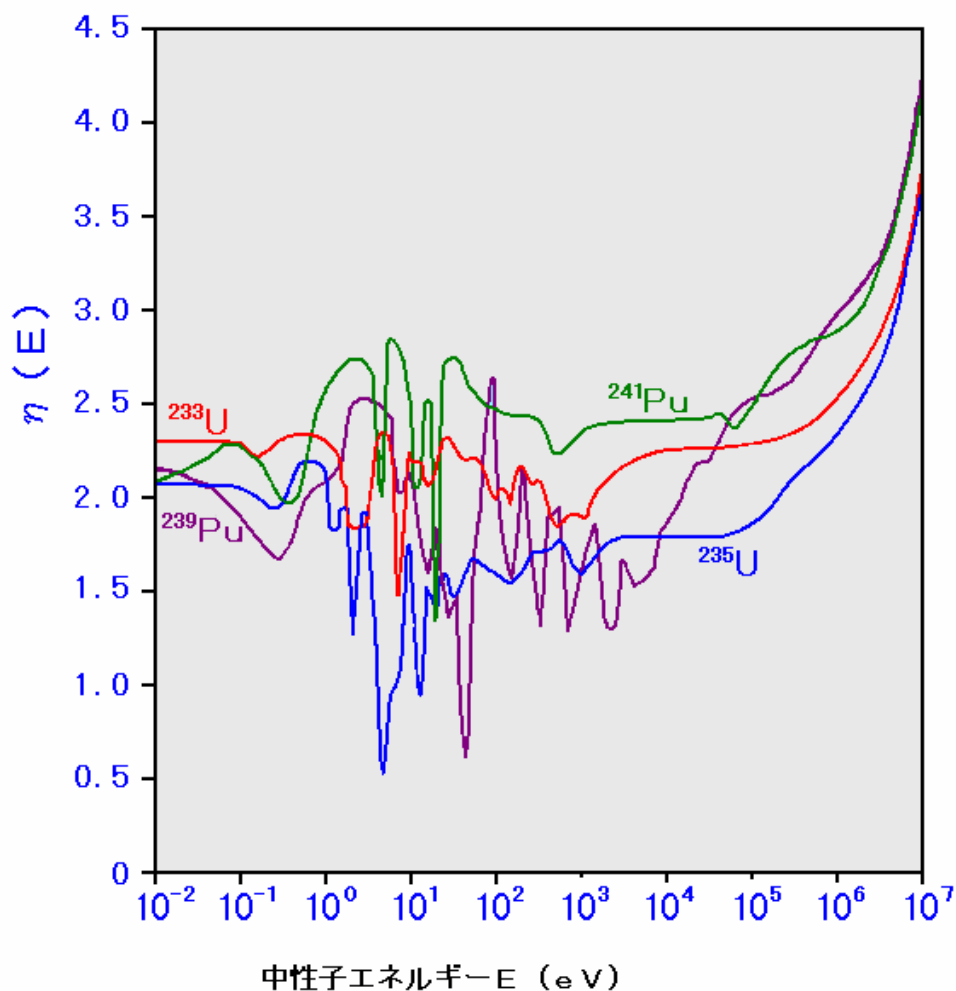


図3 代表的な核分裂性物質に関する η 値

中性子を ^{238}U に吸収させれば、核分裂性物質である ^{239}Pu に変換することができる。これが先

に ^{238}U を親物質と呼んだ理由である。 ^{239}Pu の中性子による核分裂では、特に高いエネルギーの中性子に対して ^{235}U よりももっと多くの中性子が生まれる。これらのことを利用すれば、余剰の中性子を ^{238}U に吸収させることにより、 ^{239}Pu を生成し、主に ^{239}Pu の核分裂を利用した連鎖反応で原子炉を臨界にすることが考えられる。このようにすれば失った ^{239}Pu よりも多くの ^{239}Pu を生み出すことができ、これが可能となれば天然ウランをほぼすべて核分裂させて利用できることになる。(もっとも使用済み燃料からプルトニウムを取り出す際、廃棄物の中にプルトニウムが混じりこんだりして、天然ウランすべてを利用できるわけではない。70%程度を利用できるというのが適当であろう。しかしそれでも天然ウランの 0.7%程度しか利用できない現在の方法に比べれば 100 倍も利用できることになる。)

原子炉の中では多くの放射性物質が生まれている。中性子に更に余裕があれば、これらによる核反応を用いて、放射性廃棄物を安定で問題のないものにすることも可能である。核分裂と核分裂性核種の生成とに中性子が使われるとすると、余剰の中性子は1以下になる。無駄な中性子吸収や漏れを考えると実際にはごく僅かとなる。しかしその利用は放射性廃棄物の安定化をはじめとする画期的な原子力利用の可能性を秘めており、現在の知的生物である人類に「どのように利用するのか」と極めて興味深い問題を提供している。CANDLE 燃焼はその解答例のひとつである。

2. CANDLE 燃焼とは

2.1. 燃焼法の概念

まず 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い。即ち、この燃焼法を採用すると、図4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ずに、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。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7の方が適切である。図7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。

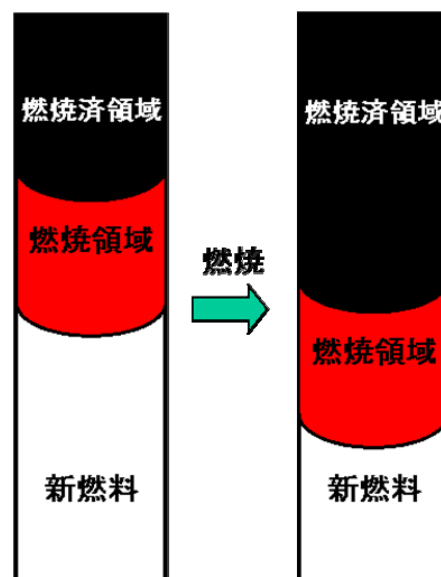


図4 CANDLE 燃焼(移動方向は逆も可能。炉心高さは説明のため極端に長くとってある。)

これが可能なのは、燃料の無限体系中中性子増倍係数 k_{∞} が燃焼とともに図5に示すような特別な変化をするように設計されているためである。ここで横軸は中性子束を時間で積分した中性子フルエンスという量になっている。この量は燃焼度と比例すると考えてよい。CANDLE の新燃料の k_{∞} は1以下だが、燃焼とともに増大しやがて1以上となる。最大に達するとそこからは減少し始め、やがて1以下となる。このような燃料を作ることができれば、燃焼領域の新燃料側では k_{∞} が増加し、その反対側(使用済み燃料側)では減少していくことになる。

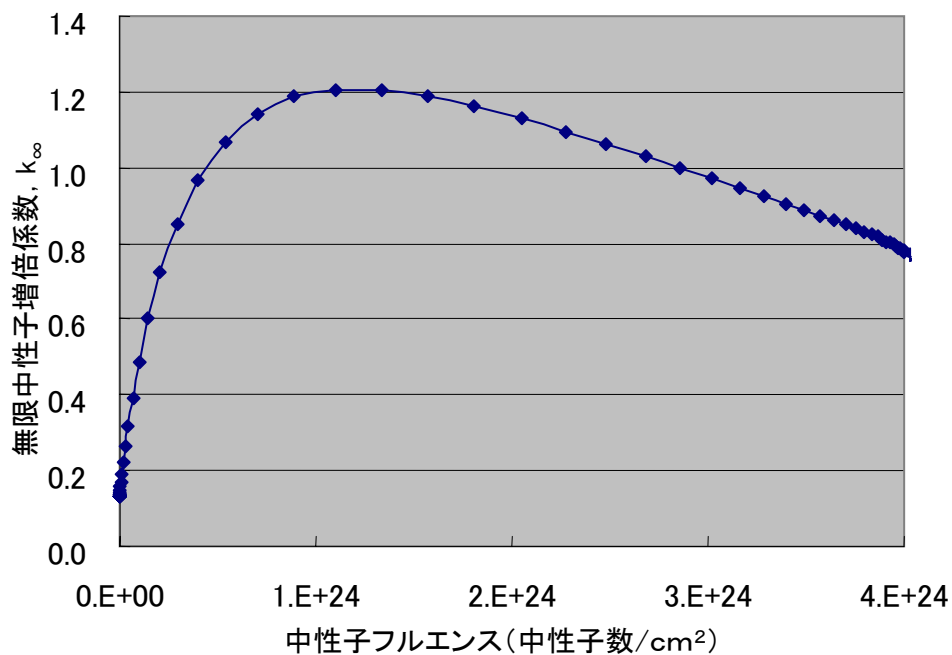


図5 横軸に中性子フルエンスをとった場合の燃料の無限体系中中性子増倍係数

図5では横軸を中性子フルエンスにとったが、これを炉心の中心軸(Z 軸)座標にとると図6のようになる。左が新燃料側であり、右側が燃焼済みということになる。ピークより左側では燃焼とともに k_{∞} が増加し、右側では減少する。このためピークは左側、即ち新燃料側にシフトすることになる。 k_{∞} がピークをとるあたりで中性子束もピークをとる。ピークから離れると k_{∞} は小さな値をとりやがて1以下となるので、中性子束もゼロに近づく。このため燃焼が起こらないので、左端及び右端では k_{∞} は一定の値を示すようになる。平衡状態になると k_{∞} の空間分布は時間とともに変化しなくなり、形を変えずに新燃料側にシフトしていきただけということになる。 k_{∞} に図5のような変化をさせるのはそれほど困難なことではない。具体的な方法は原子炉の形式によって異なるので、後で説明する。

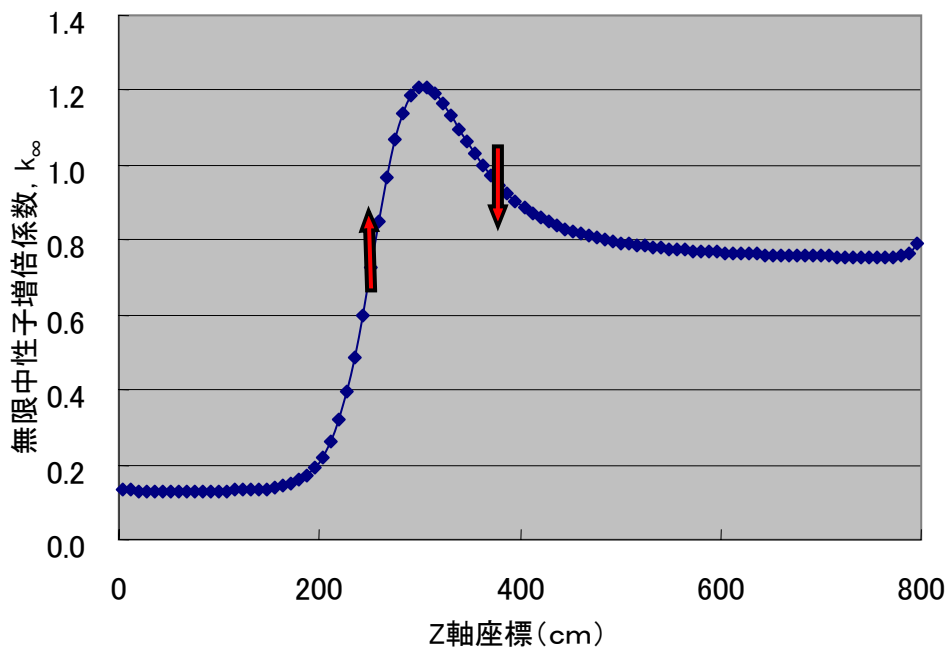


図6 中心軸(Z 軸)上の燃料の無限体系中性子増倍係数
(矢印は燃焼とともに変化する方向)

付け加えると、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。これについては「3. 数学的説明と解析方法」で原理を説明する。

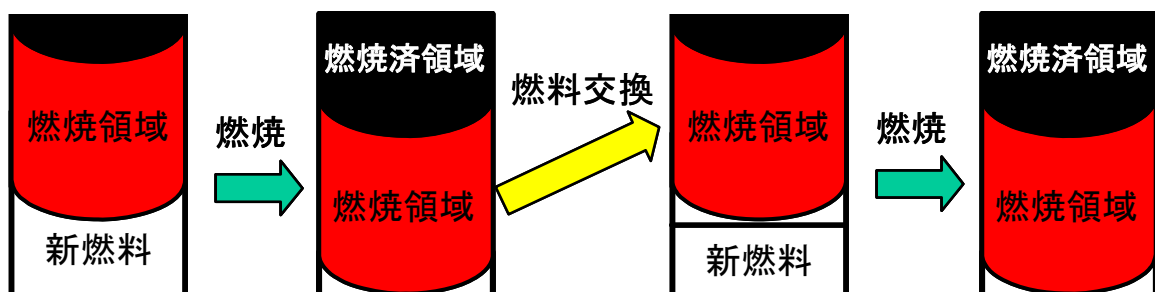


図7 CANDLE 燃焼における燃料交換

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7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様な組成でよく、製作は簡単になる。

いったん第1炉心がうまくできたら、第2炉心からの新燃料の製作は簡単となる。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炉心では、理想的な炉心構成がうまくできなくて、燃焼に伴う余剰反応度の大きな変化が生じ、制御棒等を必要とするようになるかもしれない。このような場合、第1炉心のためだけの特別な原子炉をつくるのが適当かもしれない。この炉には余剰反応度制御のための制御棒等をつけておく。これを燃焼させれば、第2炉心用の燃料ができあがる。この組成は理想的な CANDLE 炉心の組成に近いはずである。これを余剰反応度制御のない通常の CANDLE 炉に移すようにするわけである。このようにして、第1炉心用の原子炉1基だけで、多くの CANDLE 炉心を運転することができる。もし第2炉心でも理想の CANDLE 燃焼の組成とかなり異なり、余剰反応度の変化が大きい場合は、更に同じ第1炉心専用原子炉で、満足できる組成が得られるまで燃焼を続けられればよい。

現在、第1炉心の燃焼領域を構成する問題の研究が進んで、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おり、第1炉心専用原子炉は不要になるとの確信が得られつつある。

2.2. 燃焼方式の特長と問題点

どのようにすれば図5のような k_{∞} の燃焼に対する変化が得られ CANDLE 燃焼が可能になるかを先に説明すべきであるが、具体的な方法は原子炉の形式によって異なるので、後回しにし、このような燃焼が可能となると一般的にどのような特長が期待できるかということから説明する。一般的考察から次のようなことが期待される：

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一般的な原子炉では、燃料交換をするとその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、中性子を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(反応度を充分大きな正の値にしておくのと同じ意味)。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。これは1章で述べた余剰中性子が少ないという状況で極めて望ましいことである。
- 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、核反応に関するデータの精度や計算手法の精度が高くなっただけでなく、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

においても、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。例えばアウト・イン燃焼方式による長寿命炉が提案されているが、その場合は出力ピーキングが外側から中心部に移行しており、その冷却を最適化しようとする、最初はオリフィスの外側を開けておいて、その後絞り込む。中心部では最初絞り込んでから開けるというような方法を採用する。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。

軽水炉等では新燃料の濃縮度を高くして燃焼度を上げることにより炉心寿命を長くしている。この場合、寿命はもっぱら材料健全性と許容余剰反応度で決まる。これ以上寿命を延ばそうとすると出力密度を低くすることになる。こうすれば燃焼度が同じでも運転年数を長くすることができる。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に運転した後、また工場に戻す(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を使用する場合、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が1以下であり(設計によっては少し1を超えても可能である)、これが燃焼とともに増加し、やがて1よりも大きくなるといところが CANDLE 燃焼を成立させるための重要な条件である。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で安全になる。

一方、問題点としては次のようなことがあげられる:

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とは言うものの、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。

しかし、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 年間でも 40cm、20 年間でも 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。

取替え燃料の製作は簡単になるが、初期炉心は燃焼領域をうまく模擬する燃料を製作しなければならない。燃焼領域には放射性物質がたくさん入っているが、これを容易に

手に入る物質で模擬するのは難しいと考えられる。要求されることは次のようなことである。

- 平衡炉心の実効中性子増倍係数を1にしなければいけない。
- 平衡炉心になるまでの実効中性子増倍係数の変化を小さくする。
- 平衡 CANDLE 炉心に速やかに移行させる。

初期炉心の実効中性子増倍係数の変化が大きい場合は制御装置を必要とするかもしれない。この場合は 2.1. で述べたように、平衡炉心燃料作成のための原子炉を特別に作るのもひとつの方法である。現在、第1炉心の燃焼領域を構成する問題の研究が進んで、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おり、第1炉心専用原子炉は不要になるとの確信が得られつつある。

要求を満たすような色々な解決策が考えられるが、ここではこれ以上踏み込まず、6.1. で一例を紹介することにする。

以上の説明で、CANDLE 燃焼が極めて優れた燃焼法であることをわかっていただけたであろうか。それぞれの炉型で更に特筆すべき特長が現れるのだが、これについてはそれぞれの解析結果を踏まえて説明する。以下ではこの燃焼法をブロック燃料型高温ガス炉及び鉛ビスマス冷却金属燃料高速炉に適用した場合についての計算結果を示す。その前に CANDLE 燃焼の解析法について簡単に触れておくことにする。

3. 数学的説明と解析方法

CANDLE 燃焼の原理は数学的に説明すると解りやすい部分がある。また解析方法の説明は式を用いなければうまくできない。ここでは CANDLE 燃焼の数学的説明と解析方法の説明を行なうが、数式を嫌われる読者は本章を飛ばしていただいて結構である。その場合でも他の章を理解できるはずである。

CANDLE 燃焼炉を直接解くことは容易ではない。厳密な意味で平衡炉心になっているのか確かめるのが難しい。出力分布が時間とともにシフトするので長い座標軸を使わなければならないし、収束判定も難しい。これに関して詳しく述べることは省略し、解き方の原理だけを述べるに止める。詳しくは参考文献[2]を参照されたい。

解くべき方程式は中性子輸送方程式と核種の変換方程式である。今問題にしている精度では中性子輸送方程式は中性子拡散方程式で充分である。更に式を簡単にするため、円柱座標を用いて式を表す。これは特に拡散方程式が CANDLE 燃焼炉の解析に適しているというわけではなく、厳密な輸送方程式を使ったとしても、ここでの式の変形は同様にできる。空間を 3 次元の扱いにしたとしても、同様な式の展開は可能である。

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D_g \frac{\partial}{\partial r} \phi_g + \frac{\partial}{\partial z} D_g \frac{\partial}{\partial z} \phi_g - \sum_n N_n \sigma_{R,n,g} \phi_g + \sum_n N_n \sigma_{n,g-1 \rightarrow g} \phi_{g-1} \\ + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'} \sum_n N_n \nu \sigma_{F,n,g} \phi_{g'} = 0 \end{aligned} \quad \text{--- (1)}$$

核種の変換方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial N_n}{\partial t} = -N_n \left(\lambda_n + \sum_g \sigma_{A,n,g} \phi_g \right) + \sum_{n'} N_{n'} \lambda_{n' \rightarrow n} + \sum_{n'} N_{n'} \sum_g \sigma_{n' \rightarrow n,g} \phi_g \quad \text{--- (2)}$$

これらの式は原子炉理論で最も基本的なものであり、使用した変数の記号も一般的なものを使っている、説明を省略する。馴染みの無い読者は原子炉理論の教科書を見ていただきたい。これらの式を連立させて解けば解が求まる。

まったく今までの原子炉解析と同じである。しかし極めて異なった特徴があるので、それについて少し述べておく。一般の原子炉解析では原子炉の中の核種密度分布は与えられていて、これに対して出力密度や臨界性を解くわけである。CANDLE 炉ではこうはいかず、燃焼領域がどこにあるのか定かではない。理想的な条件では無限のかなたからやってきて反対方向の無限のかなたに去っていく。広がりがあるはずだがそれもわからない。一般の原子炉解析で境界条件(中性子源条件もこれに当てはまる)と呼んでいる出力分布を座標に固定するものがないのである。にもかかわらず、出力分布は厳然と存在する。

計算の難しさもこれと関係しており、燃焼領域のシフトがあるため難しくなる。これを防止するためには、燃焼領域の移動に乗った座標系で考えるとよい。これだと燃焼が経過しても燃焼領域は静止したままとなる。このような座標系への変換はガリレイ変換となる。この変換により中性子拡散方程式と核種変換方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D_g \frac{\partial}{\partial r} \phi_g + \frac{\partial}{\partial z} D_g \frac{\partial}{\partial z} \phi_g - \sum_n N_n \sigma_{R,n,g} \phi_g + \sum_n N_n \sigma_{n,g-1 \rightarrow g} \phi_{g-1} \\ + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'} \sum_n N_n \nu \sigma_{F,n,g'} \phi_{g'} = 0 \end{aligned} \quad \text{--- (3)}$$

$$-V \frac{\partial N_n}{\partial z'} - N_n \left(\lambda_n + \sum_g \sigma_{A,n,g} \phi_g \right) + \sum_{n'} N_{n'} \lambda_{n' \rightarrow n} + \sum_{n'} N_{n'} \sum_g \sigma_{n' \rightarrow n,g} \phi_g = 0 \quad \text{--- (4)}$$

ここで V は燃焼領域の移動速度である。 V は未知量であるため、求める必要がある。

これらの式を解くには繰り返し法を用いることになるが、詳しいことは省略する。参考文献[2]を参照されたい。(3)式はガリレイ変換では変化せず(1)式と同じである。重要なことは(3)及び(4)式で時間変数が消えたことである。このため計算は極めて簡単となり、収束も確実なものとなる。なお(3)式はより厳密な輸送方程式であっても、ガリレイ変換では変化しない。

得られた方程式からいくつかのことが言えるが、ここではもっとも重要と考えられることをひとつ

示しておく。(4)式で核変換は中性子反応と放射性崩壊の2種類があるが、一般に放射性崩壊は無視できる。この場合 ϕ_g の代わりに $\phi_g / V = \Phi_g$ の式を書くと、(3)及び(4)式は次のように V の現れない方程式系となる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D_g \frac{\partial}{\partial r} \Phi_g + \frac{\partial}{\partial z} D_g \frac{\partial}{\partial z} \Phi_g - \sum_n N_n \sigma_{R,n,g} \Phi_g + \sum_n N_n \sigma_{n,g-1 \rightarrow g} \Phi_{g-1} \\ + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'} \sum_n N_n v \sigma_{F,n,g'} \Phi_{g'} = 0, \\ - \frac{\partial N_n}{\partial z} - N_n \left(\sum_g \sigma_{A,n,g} \Phi_g \right) + \sum_{n'} N_{n'} \sum_g \sigma_{n' \rightarrow n,g} \Phi_g = 0 \end{aligned}$$

これは中性子束レベル即ち出力を n 倍すれば燃焼領域の移動速度も n 倍になること、及び出力の絶対値は n 倍になっても相対的な形は変わらないことを示している。即ち出力を変化させても、燃焼領域の移動速度や出力密度の絶対値は変化するが、出力分布は変化しないわけである。但し、放射性崩壊が無視できないときはこの結果は成り立たないことに注意すべきである。この場合、出力分布よりも中性子増倍係数が増変することの方が問題となる。

燃焼領域の移動速度と取出し燃料燃焼度と全出力の関係は、近似のない次式の方がより直接的である。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sum_{g'} \sum_n N_n \sigma_{F,n,g'} \phi_{g'} dz = V \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{g'} \sum_n N_n \sigma_{F,n,g'} \phi_{g'} dt$$

ここで左辺はある半径位置での軸方向の全核分裂数であり、右辺の積分は同じ半径位置での取出し燃料の燃焼度に比例している。

4. ブロック燃料型高温ガス炉

4.1. 原理

高温ガス炉は高温熱利用ということで多様な利用が考えられることから大きな関心を持たれてきたが、最近ではその高度の安全性が注目されたり、更に経済的にも優れていると評価されたりして、商業炉の建設計画も進んでいる。更にはここで使われている被覆燃料粒子が高い燃焼度まで健全性を保てるというので、プルトニウムやマイナーアクチニドの消滅にも適した原子炉として注目されている。詳しくは参考文献[3]に書かれている解説を参照されたい。

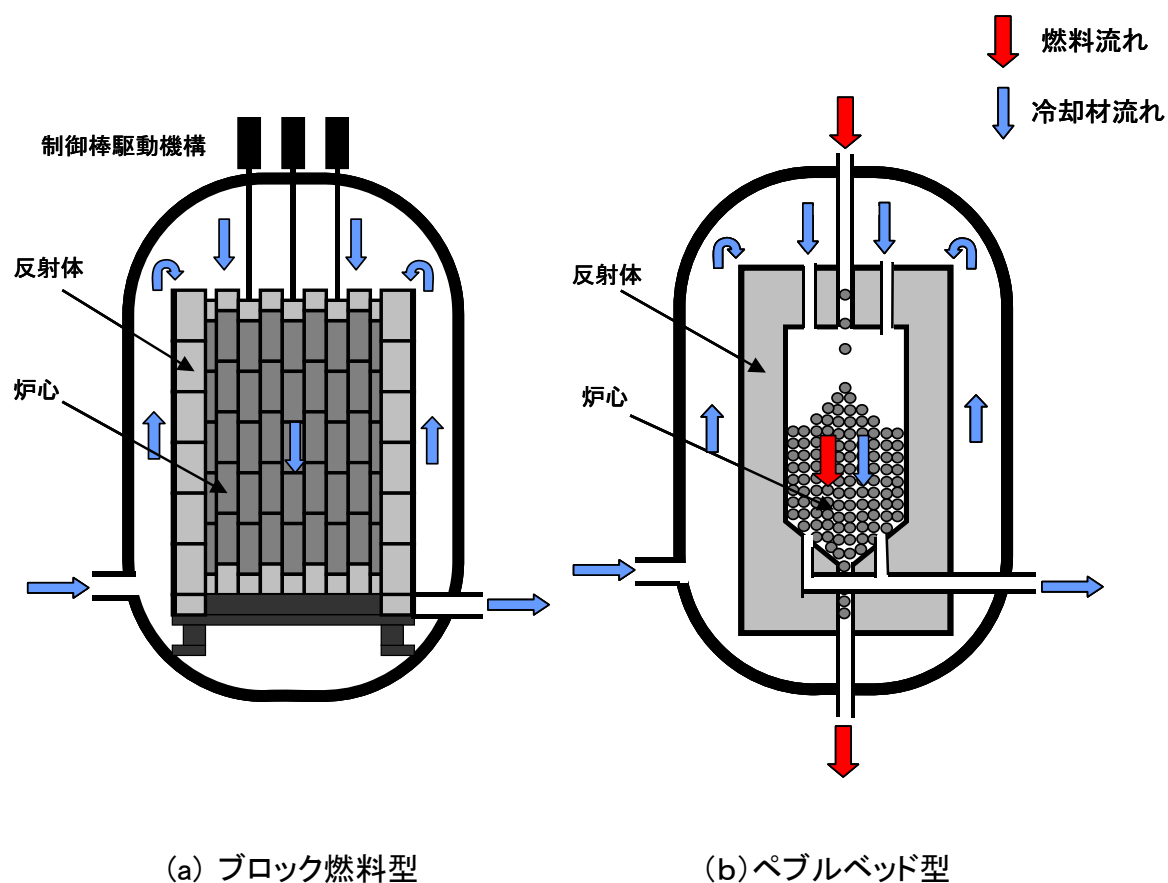


図8 高温ガス炉の概念図

高温ガス炉には大きく分けてブロック燃料型とペブルベッド型とがある。これらの概念図を図8に示す。これらの図では、長さの比が実際のもとのはかなり異なって描かれているので注意してほしい。例えば、ペブルベッド型炉のペブル(燃料球)の大きさはテニスボール程度であり、原子

炉圧力容器の大きさは大型軽水炉の場合とさほど変わらない。またブロック燃料型のみ制御棒駆動機構が描かれているが、ペブルベッド型においても燃焼制御用こそいないが、起動停止用の制御棒駆動機構は必要である。原研で運転されている高温ガス実験炉はブロック燃料型であり、まもなく南アフリカで商業炉として建設されようとしているのはペブルベッド型である。ペブルベッド型は運転中に燃料交換ができるというメリットがあるが、技術的な困難も含んでいる。

CANDLE 燃焼を適用しようとする場合、現在運転されている原子炉の中では、ブロック燃料型高温ガス炉が、大きな設計変更を必要とせず、最も適した原子炉といえる。この場合の燃焼と燃料交換の様子を図9に示す。この図では出力分布と代表的な核種の密度が炉心軸にそってどのように変化するかを同時に示している。

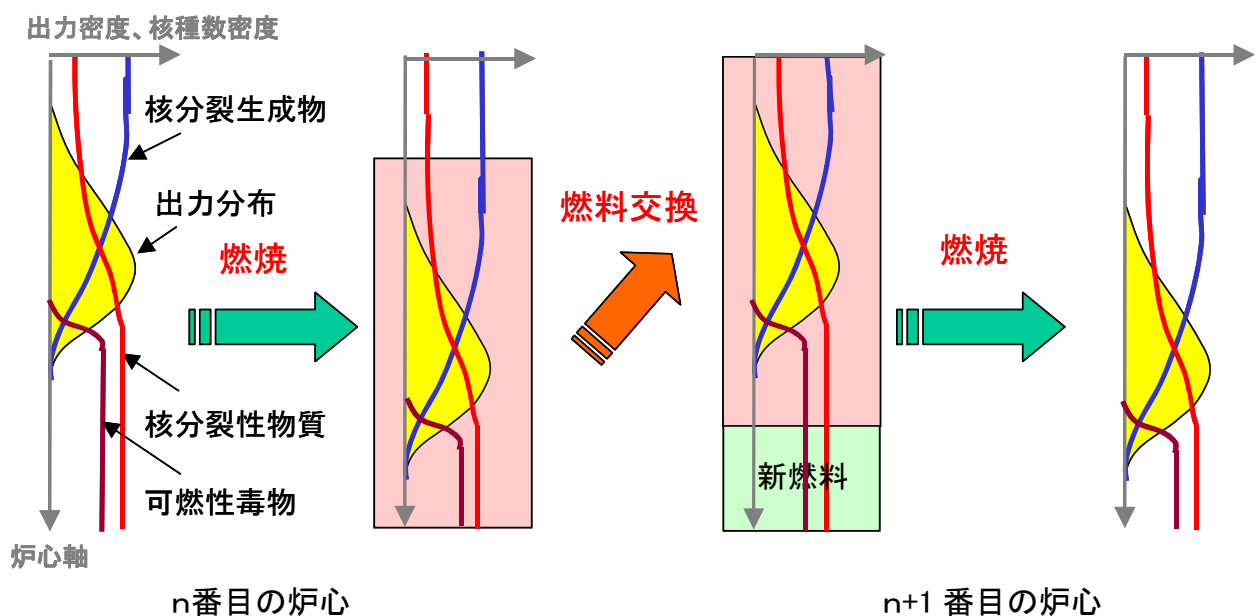


図9 ブロック燃料型高温ガス炉での CANDLE 燃焼

熱中性子炉の場合は可燃性毒物を燃料に加えることにより CANDLE 燃焼を実現する。可燃性毒物のマイクロ吸収断面積が核分裂性物質のマイクロ吸収断面積より充分に大きければ、可燃性毒物は燃焼領域から新燃料領域に漏れてくる中性子を吸収して速やかに無くなり、核分裂性物質が残って、この部分は燃焼領域に変わっていく。このようにして CANDLE 燃焼が可能となる。現在一般の原子炉で用いられている可燃性毒物は、燃焼に伴う余剰反応度の変化を抑えるために使われており、小さな塊の形にして中性子吸収の自己遮蔽効果をうまく利用しているが、CANDLE ではできるだけ速やかに無くなるのが理想的で、自己遮蔽が少なくなるよう、黒鉛マト

リックス等に薄く混ぜ込むといった使い方をする。

ブロック燃料の場合、軽水炉等のピン型燃料と違って、図から明らかなように、大幅な設計変更なしで CANDLE 式の燃料交換を行うことができる。この図では CANDLE の特徴を際立たせるため、燃焼領域の移動距離を大きくとっているのが、実際の設計とはかなり違ったものとなり、取替え部分が大きくなってしまったが、実際には、燃焼済み1ブロックを取り除き、新燃料1ブロックを装荷する程度である。それでも運転サイクル寿命は数年になるのが普通である。

4.2. 特長

ブロック燃料型高温ガス炉に CANDLE 燃焼を適用した場合の特長について纏めると次のようになる：

1) ペブルベッド炉の重要な特長を有する。

- 燃焼制御のための制御棒等を必要としない。

これは安全面から特に重要なので、説明を加えておく。高温ガス炉は冷却材として使用するヘリウムの圧力が 70 気圧程度の高圧になっており、圧力容器を貫通する制御棒駆動機構が飛び出す可能性がある。このようなことが起こると、原子炉には大きな反応度が印加され、出力が暴走する。燃焼反応度制御用の制御棒が無い CANDLE 炉では、その他の制御棒だけであり、例え飛び出すことがあっても、それほど大きな反応度は添加されず、反応度事故は収束する。

- 原子炉特性が時間とともに変化しない。

● 運転が簡単で信頼性の高いものになる。2) ペブルベッド炉に比べ多くの利点を有する。

- 出力時燃料交換の為に複雑な設備が不要。
- ペブルベッド炉では燃料の燃焼履歴がペブル毎にランダムに異なり、コントロールできず、予測不能であるが、CANDLE 炉心では個々の燃料の燃焼を完全にコントロールでき予測できる。
- ペブルベッド炉では燃料が積み重なりながら動くので破損しやすいが、ここではそのようなことがない。

3) 燃焼領域の進行方向と逆方向に冷却材を流すことにより、燃料最高温度を低くできる。

出力分布が燃焼領域の進行方向にシフトしており、かつ後方に指数関数的に減少している。このような分布に対して燃焼領域の進行方向と逆方向に冷却材を流すことにより、燃料最高温度を低くできる。

これ以外に 2.2. で述べた特長はもちろんそのまま成立する。

4.3. 解析結果

設計パラメータを表1に示す。可燃性毒物としては天然ガドリニウムを用いた。出力や炉心形状は原研で運転されている HTTR の値を殆どそのまま採用している。HTTR は実験炉であり、出力が極めて小さい。このため商用炉には向かない設計となっているが、設計データを得やすいという理由でこの炉の値を採用した。

計算は高温ガス炉の解析によく用いられる4群拡散方程式を採用した。群定数は JENDL-3.2 ライブラリーと SRAC コードを用いて求めた。コードの制約により可燃性毒物を燃料カーネルに混ぜざるを得なかった。これは中性子遮蔽効果がきいて可燃性毒物のミクロ断面積を小さくしてしまい、CANDLE 特性を悪くする。

表1 ブロック燃料型高温ガス炉の設計パラメータ

原子炉	熱出力	30MW
	炉心半径	115cm
	径方向反射体厚さ	100cm
燃料	²³⁵ U濃縮度	15w/o
	燃料カーネル	UO ₂
	可燃性毒物	天然Gd(3.0w/o)
	被覆	TRISO
	カーネル直径	0.608mm
	被覆粒子直径	0.940mm
	粒子充填率	30.0%

表2 ブロック燃料型高温ガス炉の計算結果

実効中性子増倍係数	1.008
燃焼領域移動速度	29.2cm/年
出力密度軸方向半値幅	154cm
燃焼度	最大 12.3%(115.2GWD/HMt)
	平均 10.7%(100.3GWD/HMt)

この設計に対して CANDLE 燃焼が成立することが確かめられた。結果を表2に示す。燃焼度が小さく良い結果とはいえないが、これは可燃性毒物を燃料カーネルに入れ、自己遮蔽効果によってミクロ吸収断面積を小さくしてしまったからである。今後可燃性毒物を黒鉛に混ぜるなどすれば、結果は大幅に改善できることが解っている。これについては特別な技術上の問題はない。

解体核プルトニウムの消滅にこの方法を用いることも検討しているが、燃焼度が高くなればなるほど、CANDLE 燃焼の良さが発揮される。90%近くの ^{239}Pu を消滅できることが示されている。一般の炉で燃焼度を高くすると、出力分布にひずみができ、しかもこれが燃焼に伴い大きく変化するが、CANDLE 炉では変わらない滑らかな分布である。また一般の炉では反応度係数などの炉特性も大きく変化するが、CANDLE 炉ではそのようなことはない。

5.1. 原理

The diagram illustrates the fuel exchange process between two reactors, labeled n and $n+1$.

Reactor n (Left): The vertical axis is labeled "炉心軸" (Core Axis) and the horizontal axis is labeled "出力密度、核種数密度" (Power density, Nuclide density). The core contains a yellow region representing the "出力分布" (Power distribution) and a red line representing the "核分裂生成物" (Fission products). The fuel is labeled "238U". The process is labeled "燃焼" (Combustion).

Fuel Exchange: An orange arrow labeled "燃料交換" (Fuel exchange) points from Reactor n to Reactor $n+1$.

Reactor $n+1$ (Right): The core contains a yellow region representing the "出力分布" (Power distribution) and a red line representing the "核分裂生成物" (Fission products). The fuel is labeled "天然または劣化ウラン" (Natural or depleted uranium). The process is labeled "燃焼" (Combustion).

図10 高速炉での CANDLE 燃焼

即ち新燃料として天然ウランまたは劣化ウランを使うことができる。この原理は新燃料領域の ^{238}U が燃焼領域から漏れてくる中性子を吸収することによって ^{239}Pu になるのを利用している。

天然ウランの未臨界度は大きいので、体系を臨界に持っていくためには、多くの中性子を ^{238}U に吸収させる必要があり、極めて中性子経済の良い原子炉であることが不可欠である。このためには中性子スペクトルが極めて硬いことが必要になってくる。

新燃料領域に多くの中性子を供給することから、燃料の燃焼度は大きくなる。これはまた燃焼領域の移動速度を小さくすることになる。

なお似たアイデアを水爆の父 E.Teller が提案しているが[1]、彼らはトリウムを使っている。しかしトリウムを使った場合、厳密な意味では CANDLE 燃焼は無理であることを我々は確認している。

5.2. 解析結果

鉛ビスマス冷却金属燃料の場合の基本設計パラメータを表3に示す。他の冷却材や燃料を用いた場合についても計算したが、基本的な値は変えていない。新燃料としてはとりあえず天然ウランを用いたが、劣化ウランでも同様の設計は可能である。

中性子スペクトルを硬くして中性子経済をよくするために、燃料体積割合を 50%と現行の設計より大きくとっている。この場合冷却材の冷却能力が小さくなるが、実際の設計ではチューブインシェル設計[4]の採用を考えている。この燃料は練炭のような構造になっており、冷却材がその練炭の穴を流れるようになっている。こうすれば少ない冷却材で高い冷却能力を得ることができる。高温ガス炉で説明したとおり、このような構造は燃料交換の上からも CANDLE 燃焼に適している。

計算は 21 群拡散方程式を採用した。群定数は JENDL-3.2 ライブラリーと SRAC コードを用いて求めた。

表3 天然ウラン装荷型高速炉の設計パラメータ

原子炉	熱出力	3000MW
	炉心半径	200cm
	径方向反射体厚さ	50cm
燃料ピン	燃料形態	U-10w%Zr
	燃料ペレット直径	0.8cm
	被覆管材料	HT-9
	被覆管厚さ	0.035cm
冷却材		Pb-Bi(44.5%,55.5%)
燃料体積割合		50%

この設計に対して CANDLE 燃焼が成立することが確かめられた。結果を表4に示す。

酸化物燃料では CANDLE 燃焼を実現することが困難であることがわかる。窒化物は少し努力すれば可能であろう。これに対し冷却材はある程度の優劣はあるものの、それほど大きな差では

なく、いずれの冷却材でも金属燃料であれば CANDLE 燃焼が可能であることが示された。

燃焼領域移動速度はいずれの場合も約4cm/年といった極めて遅い値を示した。また燃焼度も約 400GWd/t という極めて大きな値を示した。これは装荷燃料の約 40%が燃焼したことを意味している。これらの量はいずれの場合でも同様の値を示した。

表4 天然ウラン装荷型高速炉の計算研究結果

(a) 鉛ビスマス冷却で燃料を変えた場合

燃料	酸化物	窒化物	金属
実効中性子増倍係数	0.926	0.990	1.015
燃焼領域移動速度 (cm/年)	4.7	3.5	3.8
使用済燃料平均燃焼度 (GWd/t)	452	445	426

(b) 金属燃料で冷却材を変えた場合

冷却材	ナトリウム	鉛ビスマス	鉛	ヘリウム
実効中性子増倍係数	1.006	1.015	1.012	1.035
燃焼領域移動速度 (cm/年)	3.8	3.8	4.1	3.8
使用済燃料平均燃焼度 (GWd/t)	415	426	427	413

5.3. 特長と問題点

先に得られた結果を踏まえて中性子経済の極めて優れた高速炉に CANDLE 燃焼を適用した場合の特長について纏めておく。

これらの結果は今までの原子炉の常識を覆すような次のような特長を示している。

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。今まで軽水炉用の濃縮ウラン燃料を作ってきたが、これに伴い劣化ウランが多量に残っている。元の天然ウランの 82%が劣化ウランになる。これの 40%が燃えるとする、CANDLE 燃焼で元の天然ウランの 33%を更に使えることになる。軽水炉での利用は 18%を 4%燃やすということで、元の天然ウランの 0.72%ということになる。即ち今まで産み出したエネルギー量の 45 倍のエネルギーを劣化ウランを CANDLE 炉の燃料として利用することにより産み出すことができる。

3) 燃焼速度は4cm/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。

但し、次のような問題点が考えられる。

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。少なくともここで紹介したような設計例があり、これらの設計は現在可能と考えられる設計となっている。

優れた中性子経済を有する高速炉は一般に負の出力反応度係数を得る設計が難しい。このようなこともよく検討する必要がある。

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 40%の燃焼度は無理である。かなりの研究開発が必要であろう。照射

実験をする必要がある。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必要である。これについては 5.2.で改めて議論する。

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。圧力が高くなりすぎるのでガスは燃料要素から放出する必要がある。これは大きな設計変更を必要とする。固体成分の量も大きくなるので、新燃料の密度を低くして、これらの蓄積に対しても対応できるようにする必要がある。

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、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。

6. 追加

以上で CANDLE 燃焼の基本的なことについて説明した。但し、きちんとした説明をしようとする
と長くなり本論から外れる恐れがあるため説明を省略したところがある。そのうち重要と考えられ
る「平衡状態はうまくできたが、これをどのようにして達成するのか？初期炉心は組めるの
か？」ということと、「中性子経済に優れる高速炉で 40%もの燃焼度を達成できるとしたが、材料
がもつのか？」ということに関して説明を加えておく。

6.1. 初期炉心問題

「3. 数学的説明と解析方法」では直接平衡状態を解く方法を示した。今まで示した解析結果は
この方法で求めている。初期炉心問題を検討するにはシミュレーションコードが必要であり、これ
は従来のコードと同じように(1)及び(2)式を正直に解くことになる。

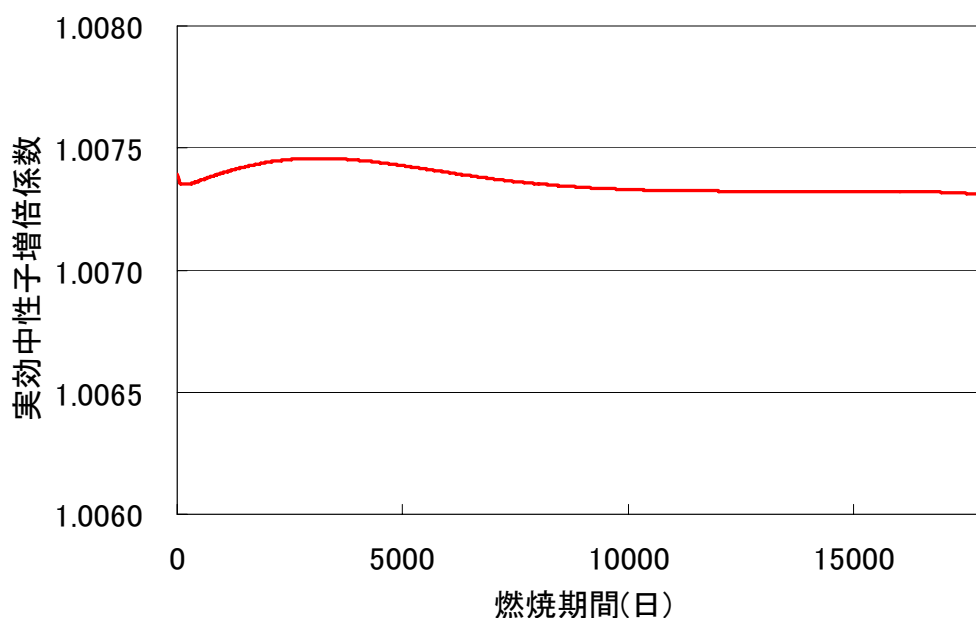


図11 定常解を初期値とした場合のシミュレーションにおける
実効中性子増倍係数の時間変化

既に求めた平衡解を初期値として新たに作ったシミュレーションコードを走らせてみたところ、図11のような結果を得た。少し実効中性子増倍係数が変化しているのは、時間メッシュと空間メッシュの対応にずれがあったためであり、数値計算上の違いである。シミュレーションコードは前もって正しいことを検証している。この結果は平衡計算コードが正しかったことを示している。

初期炉心には、容易に手に入れられるウランやプルトニウム、及び安定な核種しか用いることができない。ここではアクチニドはプルトニウムと濃縮ウランの組み合わせで、核分裂生成物はネオプとタングステンの組み合わせで模擬してみた。このようにして作成した初期炉心を初期条件として新たに作成されたシミュレーションコードを用いてシミュレーションを行ったところ、図12のような結果を得た。

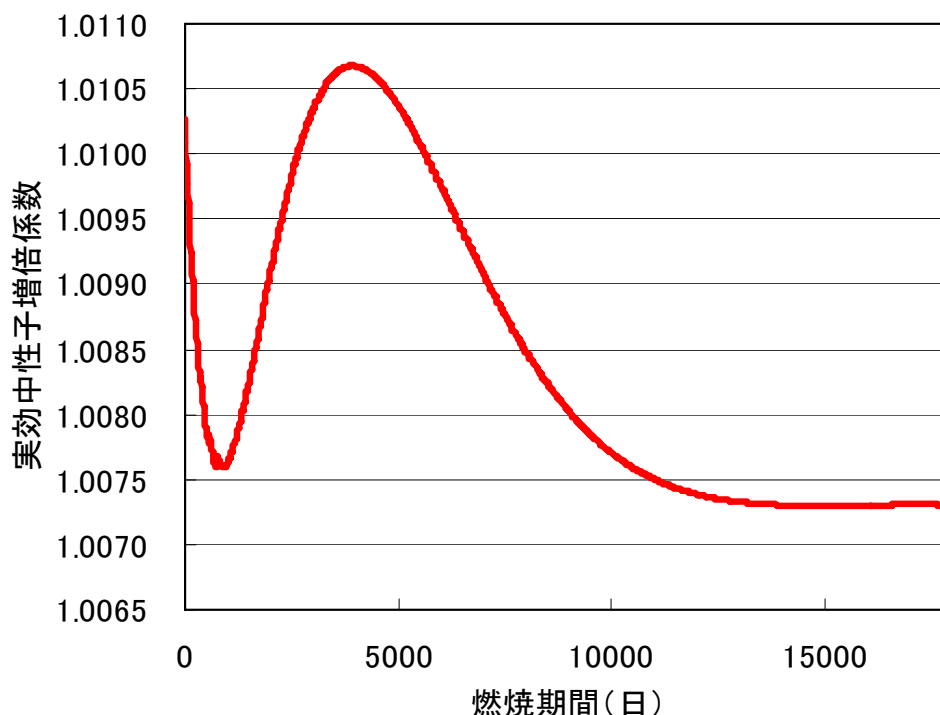


図12 容易に手に入る材料で作った初期炉心を初期値とした場合のシミュレーションにおける実効中性子増倍係数の時間変化

実効中性子増倍係数は時間とともに振動することがわかる。時間変化の最大値は 0.0034 程度であり、充分小さいといえる。更に最適化を進めれば、この変化量をもっと小さくできるはずである。

6.2. 高燃焼問題

現在 40%も燃焼させたときの材料健全性に関するデータは見当たらない。高速炉用酸化物燃料に対しては、1970 年代に入ってから、実証試験における最大燃焼度が順調に伸び続け、1990 年に入ると 20%を超えるデータが現れたが、1994 年以降データが突然出なくなってしまった。その理由はアメリカの高速炉計画が無くなったためだと聞いている。40%までは困難かもしれないが、今まで実験がなされていないだけで、かなり高い値でも大丈夫かもしれない。また照射損傷は熱処理によってかなり改善されるとされているが、このようなことも利用できるかもしれない。いずれにしろ、近未来ではそのような材料は期待できないかもしれないが、その場合でも適当な燃焼度に達した燃料要素を簡易再処理(被覆管の更新程度)することにより解決できると考えられる。

7. まとめ

CANDLE という新しい燃焼法が提案された。一般の原子炉とは異なり燃焼のための余剰反応度を必要としない。しかも出力分布の形や炉心特性が燃焼に伴って変化しない。このため安全性や経済性に対して多くのメリットを持つことを説明した。

これを中性子経済に優れる大型高速炉に適用すると、取替え燃料としては劣化ウランか天然ウランでよい原子炉を設計することが可能で、しかもこれらの燃料の 40%を利用できることがわかった。軽水炉で X のエネルギー量を産み出したことに伴って残った劣化ウランから、さらに 45X のエネルギーを発生できることになる。今までに発生した軽水炉のエネルギー全体をおおまかではあるが、世界がおおよそ 10 年間に原子力に要求するエネルギーに相当すると仮定すると、このシステムを使えば、新たに採鉱する必要もなく、濃縮も再処理もせずに 450 年間エネルギーを供給し続けることが可能になることがわかった。

この原子炉は材料問題等、解決にかなりの時間を要する可能性がある。しかし、簡易再処理等に対応することも可能である。またいきなり大型の CANDLE 燃焼高速炉を作るのは危険であろう。これに対しては、CANDLE 燃焼を利用した小型長寿命炉を作るのもよいかもしれない。小型長寿命炉は多様な利用法が考えられるし、海外途上国への輸出等にも適している。小型は一般的に安全で経済的なリスクも小さい。しかし小型にすると中性子の漏れが大きくなり、原子炉を臨界にするのが難しくなる。プルトニウム等を加えると臨界にできるが、あまりたくさん加えると取替新燃料だけで臨界になる。これでは CANDLE 燃焼にならない。これらに比べ、ブロック燃料型高温ガス炉に適用するのは簡単で確実である。

CANDLE 燃焼の実用化はまずブロック燃料型高温ガス炉で行い、その特長を確認するとともに、問題点がないかよく経験を積んだあと、小型長寿命高速炉から高速炉への適用を開始し、最終的に劣化ウランのみを燃料とする大型高速炉へと発展させるのが適当であろう。軽水炉用濃縮ウラン製造の後に残った劣化ウランだけで 450 年の利用が可能であることがわかった。更にウランを採掘したり、海水から取り出したりしたら、この期間はさらに大幅に延びるが、実際には廃棄物の量によって利用期間が決まるであろう。ワンスルーの燃料サイクルを考えると、CANDLE 燃焼は燃焼度が現在の原子炉の 10 倍もあるので、廃棄燃料の量は 10 分の 1 になる。利用できる廃棄物処分場の規模を現在計画されているのと同程度だと考えると数百年というのは適当な値かもしれない。

その後は、放射性廃棄物の分離変換技術を駆使したゼロリリースの時代が来てほしいと願っている。

参考文献

- [1] E. Teller, et al., “Completely Automated Nuclear Reactors For Long-Term Operation II,” http://www-phys.llnl.gov/adv_energy_src/ICENES96.html (1996)
- [2] H. Sekimoto, K. Ryu and Y. Yoshimura, “CANDLE: The New Burnup Strategy,” Nucl. Sci. Engin., **139**, 1-12 (2001)
- [3] 関本 博, 他, “高温ガス炉の新展開”, 日本原子力学会誌, 44[12], 839-866 (2002)
- [4] T. Hiraoka, et al., “A High-Breeding Fast Reactor with Fission Product Gas Purge/Tube-in-Shell Metallic Fuel Assemblies,” Nucl. Technol., **93**, 305-329 (1991)

専門用語

本書を読むためだけに付けた用語説明のため、必ずしも厳密な説明になっていないのでご注意願いたい。特に「3. 数学的説明と解析方法」は飛ばして読んでいただいて構わないことと、ここでは専門用語が多く現れ、しかも説明に多くのスペースを必要とするものが多いことから省略させていただいた。

(原子核の表し方): 元素記号を書き、その左下に原子番号(構成している陽子の数)を書き、左上に質量数(構成している陽子と中性子の総数)を書く。元素記号が決まれば原子番号は一意的に決まるので、原子番号は書かないことのほうが多い。ウラン 235 だと ^{235}U といった具合に書く。

親物質: 熱中性子を吸収しても核分裂を起こさないが、核分裂性物質になる物質。

核拡散: 核兵器が所有を認められている国以外の国や団体に広がっていくこと。

核拡散抵抗性: 核拡散が起こり難いこと。

核子: 原子核を構成する粒子で、陽子と中性子のこと。

核種: 原子核の種類。その原子核を構成している陽子と中性子の数が決まれば核種も決まる。

核分裂生成物: 核分裂性物質が核分裂すると殆どの場合、2個の核分裂生成物に分かれる。これは中性子を吸収しても核分裂をしない。

核分裂性物質: 熱中性子を吸収すると核分裂を起こす物質。核分裂性物質は吸収すると常に核分裂をするわけではない。核分裂しない吸収を捕獲と呼んで区別している。

可燃性毒物: 炉心に挿入する中性子吸収材であるが、燃焼と共に中性子吸収効果の小さい物質に転換されていく。このため、燃焼に伴う中性子増倍率の減少の効果を小さくするために利用される。

ガリレイ変換: ひとつの座標系から、それに対して等速度で平衡移動していく座標系への座標変換。

軽水炉: 軽水(普通の水、重水と区別してこう呼んでいる)で中性子を減速し、炉心を冷却する炉。現在最も多く運転されている。炉心で沸騰する沸騰水型炉(BWR)と沸騰させない加圧型炉(PWR)がある。

高温ガス炉: 黒鉛で中性子を減速し、高温のヘリウムで冷却する。被覆燃料粒子を黒鉛の中に混ぜ込んだ燃料を使う。

高速炉: 中性子の減速を行わず、高速の中性子で核分裂を起こさせる原子炉。冷却材には水のような中性子を減速させるものは使えないので、ナトリウムとか鉛(あるいは鉛ビスマス合金)、ガスといったものが考えられている。

再処理: ここでは使用済み燃料からプルトニウムを取り出すことを指す。

実効中性子増倍係数: 実際に問題にしている炉心の中性子増倍係数。考えている炉心が臨界では丁度1となり、未臨界では1以下、超臨界では1以上となる。

出力, 熱出力: 原子炉のパワー。ワットが単位となるが、大きな値なので、ここでは MW(メガワット:メガは 10^6)を使っている。燃焼度等を表わす時は GW(ギガワット:ギガは 10^9)が使われることが多い。熱出力と電気出力があるが、発電効率がわかると熱出力から電気出力が計算できる。

制御棒: 中性子吸収材からできている棒でこれを使って原子炉の臨界を調節する。臨界だけ

でなく、出力等も調整できる。原子炉運転を止めるのに有効である。

断面積:核反応する割合。大きいほど核反応しやすい。(マイクロ吸収断面積参照)

中性子スペクトル:中性子のエネルギー分布。

中性子増倍係数:ある核分裂から次の核分裂が起こるまでを中性子の 1 サイクルと呼ぶと、1 サイクル経過することによる平均中性子数の変化率を中性子増倍係数と定義する。臨界では丁度1となり、未臨界では1 以下、超臨界では1 以上となる。(実効中性子増倍係数、無限体系中性子増倍係数参照)

中性子束:中性子の密度に中性子の速さを掛けた量。これに断面積を掛けると反応量となる。

中性子フルエンス:中性子束を時間で積分した量。

熱中性子:核分裂で生まれた中性子は高いエネルギーを持っているが、これを減速させ、媒質と同じ温度にまでエネルギーを低くした中性子を熱中性子という。高速中性子と比べて、一般的に核反応する割合が極めて大きい。

燃焼:原子炉で燃焼というと、核分裂性物質が核分裂を起こし、核分裂生成物に変化していくことをいう。

燃焼度:燃焼済みの燃料の単位当たりのエネルギー発生量。GWd/t の値を使うことがある。これは新燃料に含まれていたウランやプルトニウムの重さ(トンで計量)当たりの発生エネルギーをGWdで表わしたもの。GWd はGWとdの積で、GW はギガワット、dは日である。％で表わすこともある。

燃焼反応度:ここでは余剰反応度と同じ意味で使っている。

燃料カーネル:被覆燃料粒子の中心にある燃料球。(被覆燃料粒子参照)

燃料サイクル:原子炉から出てきた燃料を再処理し、分離した核分裂性物質を燃料に加工して原子炉に戻すことで、燃料の動きのサイクルを指すのだが、今ではウランの採鉱から廃棄物の最終処分まですべてを含む。

濃縮:ここでは天然ウランの ^{235}U を濃縮することを指す。

半減期:半分にまで減少するのに必要な時間。

反射体:炉心から漏れてきた中性子を炉心に戻すためのもの。

反応度:実効中性子増倍係数が臨界からどれだけ離れているかを示す量で、実効中性子増倍係数を k と表わすと反応度は $(1-k)/k$ で定義される。

反応度出力係数:出力が変化するとそれに伴って変化する反応度の割合。通常の原子炉では、原子炉を安定に制御できるように、これが負にならないといけない。正の値になると、制御が不安定になり、出力が暴走する可能性がある。

ピーキングファクター:最高値と平均値の比。

被覆管:放射性物質等が燃料から冷却材等に漏れ込まないように、燃料ペレットを覆う管。

被覆燃料粒子:高温ガス炉に用いられている、直系1mm 程度の燃料粒子。燃料カーネルを黒鉛や炭化珪素で被覆している。

崩壊:放射性崩壊を参照。

放射性崩壊:放射線を出して別の核種に変化すること。代表的なものにヘリウムの原子核 (α 線と呼ぶ)を放出して崩壊する α 崩壊、電子(この場合 β 線と呼ぶ)を放出して崩壊する

β 崩壊、高エネルギーの電磁波 (γ 線と呼ぶ) を放出して崩壊する γ 崩壊とがある。

ミクロ吸収断面積: 原子核1個当たり中性子を吸収する断面積。(断面積参照)

無限体系中性子増倍係数: 考えている炉心の大きさを無限とした場合の中性子増倍係数。 k_{∞} と表わす。(中性子増倍係数参照)

余剰反応度: 通常の原子炉では、燃焼開始時の反応度は正の値をとっているが、燃焼とともに反応度は小さくなっていき、0になると運転を止めて、燃料交換を行う。この反応度は制御棒等で抑えられ臨界にされる。ここではこのような反応度を余剰反応度と言っている。

臨界: 中性子の発生数と消滅数がバランスして中性子数が一定である状態。発生数の方が大きいとき超臨界、消滅数の方が大きいとき未臨界と呼ぶ。

臨界実験: 燃料を組み立て臨界にし、臨界量やその他の測定量を計算値と比較して、計算精度を確かめる実験。

劣化ウラン: 天然ウランを濃縮して濃縮ウランを作った時、同時に天然ウランよりも ^{235}U の濃度の低いウランが大量に発生する。これを劣化ウランと呼ぶ。

炉心: ここでは原子炉内の燃料のある領域を指している。

炉物理: 原子炉中での中性子の動きを調べる学問であり、臨界特性、出力分布、反応度出力係数などを計算する。

ワンスルー: 使用済み燃料をそのまま最終処分すること。

おわりに

平成13年度原子力基礎研究制度研究課題提案「CANDLE 燃焼方式の種々の原子炉への適応に関する研究」が採択された。その評価の中で「成果の全体について、早めに国際会議や学術誌できちんと発表しながらその技術概念を固めていくこと、並びに広く内外に PR していくことを推奨する。」という指導を得た。筆者は大学で研究と教育を行うことに関してなら専門家として豊富な経験を有しているが、内外への PR ということでは素人である。考えた末、そのような素人にとできることとして一般的な解説書を書き、配布することにした。内容がそれに相応しくなったかについては不安を感じており、読者の忌憚のないご意見をお待ちしている。また配布先についてもどこがよいのか思い巡らせてみたが、とりあえずの配布先は原子力関係者になってしまった。適当な送付先があればぜひご教示願いたい。

東工大の「世界の持続的発展を支える革新的原子力」が文部科学省の「21 世紀 COE プログラム」のひとつとして採択された。CANDLE 燃焼はこの目玉のひとつとして今後活発な研究が展開される予定である。多くの方からのご助言を期待している。

本書の作成に関しては多くの人から励ましのお言葉をいただいた。特に T. H. Pigford 教授は筆者の博士論文の指導教官であるが、博士論文で扱った中性子輸送と燃焼の結合がここでも重要な働きをしていることから関心を持っていただき励ましていただいた。E. Greenspan 教授には CANDLE 燃焼について色々議論していただいた。彼から初めて E. Teller 博士が似た研究をしておられることを教えてもらった。A. Weiberg 博士には「はじめに」で述べたように面識が無い著者に対して親切な励ましの手紙をいただいた。その他多くの研究者からご助言や励ましをいただいたここに併せて感謝する次第である。

本研究は筆者の研究室の大学院生：龍浩一、田中健太郎、高田隆史、大岡靖典、宇田川豊、富田賢、山崎真によってなされたものである。ここに感謝する。また小原徹助教授と又井秘書には研究にともなう雑務等で色々お世話になった。ここに感謝する。