

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	CANDLE炉を巡る注目の高まりについて
Title(English)	
著者(和文)	関本博
Authors(English)	HIROSHI SEKIMOTO
出典(和文)	原子力eye, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2010, 7

CANDLE 炉を巡る注目の高まりについて



東京工業大学
原子炉工学研究所
教授
関本 博 (せきもと・ひろし)

去る3月23日朝、大学のオフィスでメールソフトを起動してみると、知人から「今朝の日経に東芝とビル・ゲイツの記事が載っているが、これはあなたのやっている原子炉のことではないか？」というメールが入っていた。研究室の秘書さんのその日の最初の仕事は、駅の売店まで日経朝刊を買いに行くことになった。記事の話はすぐにピンときた。数日前、日経記者が別件で私の部屋を訪れたとき、ビル・ゲイツが中国を訪問したインターネット記事を教えてあげていた。これには最後にビル・ゲイツが東芝を訪問したことも少しだけ書かれていた。この記事をもとに東芝に取材に行くことは当然ありうることだと思っていた。しかし、秘書さんに渡してもらった日経朝刊には、1面トップに大きく扱われていたので、これには少し驚いた。この記事には私の名前は載っていなかったが、ここで取り上げられている原子炉が私の研究しているCANDLEという原子炉と似ているということは、革新的な高速炉に興味を持っている専門家なら多くの人が知っていることなので、その後またたく間に色んな取材を受けることになった。

本「原子力eye」もそのひとつである。どのような取材でもCANDLE炉とはなにかといった質問は必ずあるので、これについては本記事でまた繰り返すことはしない。CANDLE炉についての学術的内容は私のホームページに解説書載せている。但しかなり古いものなので、私がセンター長を務めるCRINESというセンターのホームページ< <http://www.crines.titech.ac.jp/>> にちゃんとした解説を載せようと思っているので、関心がおありの読者はそれをご覧いただきたい

い。

このような内容よりも、少し関心をもってくれた人達が必ず聞いてくる、「いつCANDLEのアイデアを思いついたのか？」とか「他にこのようなアイデアはないのか？」といった質問に答えるようなかたちで本文を書いてみたい。このような内容については書きやすいためか、色んな記事がインターネット上に出ているが、私が直接話していないものが多く、私には偏ったり歪曲されたりして書かれているように感じられるためである。

最初のアイデア

実はCANDLE燃焼のアイデアを思いついたのはいつのことか良く思い出せない。高速炉を勉強したときには、漠然とブランケット燃料を燃やし続けたらどのようになるかといったこと等を含めて、色んな燃焼方法を考えていた。但し、燃焼方式だけでなく、高速炉に関しては最初に読んだ専門書がPalmer & PlattのFast Reactorという本であったこともあり、色々な高速炉を夢想していた。

これらの勉強が一通り済んだころ、日本原子力研究所(原研、現原子力研究開発機構)の夏期実習に行くことができた。そこで原子炉の核計算をやらせてもらった。驚いたことは、実習で使っている計算コードが、実際の設計にも用いられているらしいことと、しかも私でもすぐ作れるものであったことである。拡散方程式をガウスの消去法を使って解いていたが、これは大学で指数実験を解析するために既にプログラムを作成

したことがあった。また群定数にはアバギアンを使っていたが、アバギアンの本は私の指導教授の部屋の本箱にあることを知っていた。大学に戻った時、私の考えを指導教授にお話ししたが、もっと重要なことがあるということで、修士論文は京大炉に行って積分実験を行い、その実験結果を、自分で作成した輸送コードを使って得た計算結果と比較するという事になった。

修士論文は高速炉設計とはあまり関係がないように思えたので、終わったら原研に行こうと考えていたのであるが、そのころ動力炉・核燃料事業団(動燃、現原子力研究開発機構)ができて、原研はもはや高速炉はやらないと教えてもらった。それでは動燃はどうかと聞いてみたら、動燃は開発する原子炉の型がきまっており、私が考えているような革新的な原子炉の研究はしないということであった。企業はもっと融通がきかないようであった。結局、指導教授のお勧めに従いアメリカに留学することにした。

アメリカでの博士論文で何を研究するかについてアメリカでの指導教授と相談したとき、CANDLE 燃焼の話もしていた。これはずっと後になり CANDLE 燃焼の話はこの指導教授としたとき、懐かしそうにその時の話をされたので、よくぞ覚えてくださっていたと感激したことを覚えている。私以上に良く覚えていて下さった。このときは結局軽水炉の最適炉内燃料管理をテーマにした。高速炉に関する関心が薄れていたこともあるが、CANDLE 燃焼は不可能である可能性が高いと予想していたこともこの選択がなされた理由である。

その後の紆余曲折

その後、アメリカのゼネラルアトミックス(GA)に勤めた。その当時、GA は高温ガス炉を大々的に開発していた。ようやく自分のやるべき革新型炉に辿りつけたという感じであったが、間もなくしてプロジェクトが打ち切られることになった。GA では大型炉の空間分布の安定性といったことに取り組み、自由な研究をやらせてもらっていたが、革新炉を提案するといったことから、少し異なる場所で仕事をしている感じがし、大学で革新炉の研究をしてみたいという気持ちが高まっていた。そんな折、東工大にうまく拾っても

らえた。

助手の間は研究室の事情もあり、核融合炉ニュートロニクスの研究を行っていたが、助教授になると早速、革新炉の研究を始めることにした。いきなり高速炉を始めると相手にしてもらえないように思えたのと、GA で研究していたというだけで一目置かれているようだったので、高温ガス炉の研究から始めた。GA にいるとき燃料を軸方向に移動させると濃縮度を1種類にしても出力分布が最適化できることを提案したことがあった。これは既にドイツでペブルベッド炉として開発されていることを知り、そのままになっていたが、博士論文で使った計算方法がうまく使えることが判っていた。この仕事が日本での私の革新型炉研究立ち上げのための最初の研究となった。

いよいよ高速炉の研究をしようと考えたとき、電中研が4S 炉という小型高速炉の研究を華々しく打ち上げた。GA で大型の HTGR に取り組んでいた者としては、小型炉というのはスケールデメリットが大きくとても実用化できるとは思えなかった。しかし彼らの説明には実用化できるという多くの可能性が示されており、興味を持たざるを得なかった。しかも小型長寿命炉の研究にはおあつらえむきにインドネシアから留学生がやってきた。日本で作りインドネシアに運んでそこで運転し、寿命がくれば新たに日本で作られた原子炉と交換し、古いものは日本に持って帰るという原子炉の研究の始まりである。

4S 炉は反射体制御を用いて、燃焼領域を炉心の下から上へ移動させようとしていた。CANDLE 燃焼では反射体なしに同じことができるはずである。冷却材としてナトリウムの代わりに鉛か鉛ビスマスを用いれば、小型化ももっと楽になるはずだ。こう考えて、小型鉛ビスマス冷却高速炉で CANDLE 燃焼が可能かどうかやってみた。ことごとく失敗であった。原子炉を大きくすれば可能かもしれないと思ったが、それでは全体のシナリオが崩れるということもあったし、中心に天然ウランを配置し、周りから燃やしていけば10年以上楽に運転できることが判ったので、CANDLE 燃焼はあっさり諦め、その後はアウトイン燃焼の小型長寿命高速炉の研究を進めることにした。

ここで提案した鉛ビスマス冷却小型長寿命高速炉はその後、意外な展開を見せることになる。ソ連崩壊直後のモスクワ近郊で開催された小型炉会議に招聘さ

れ、この炉を紹介したところ、潜水艦で使われていた鉛ビスマス冷却ベリリウム減速小型炉の設計に携わっていた人たちから、もみくちゃにされるほどの関心を示された。この会議では鉛ビスマス冷却小型高速炉の発表は無く、この時点でロシアにはこの概念は無かったと思う。しかしまたたく間に優れた設計ができ上がり、その後の着実な開発研究のおかげで、今では建設開始を目前にしている。

CANDLE 燃焼計算成功

東工大での鉛ビスマス冷却小型高速炉の設計も一段落したころ、博士コースに龍浩一君がやってきた。丁度良い機会なので、彼にスペクトルの硬い高速炉で、CANDLE 炉を設計してもらうことにした。しかしこの時点でも CANDLE 炉の成立性に対して大きな不安があった。そのため、まずは高速炉のペブルベッド炉なるものの設計をしてもらった。高温ガス炉のペブルベッド炉で既にうまくいっている計算法なので、これはうまくいくのに決まっている。期待通りの結果を出してくれたので、これで論文を書いてもらい、雑誌に受理されることが確実にってから、CANDLE 炉に取り組んでもらった。計算コードで修正する部分はほんのわずかであった。それでもいくつかの新たな工夫を必要としたが、無事 CANDLE 燃焼を実現できたのである。

龍君は早々に博士論文を書いて大学を去って行ったので、後からやってきた修士の学生に手伝ってもらって、論文をまとめた。自分としては、論文は画期的なものと思えたので、当時、原子力研究をやっている人の多くが一番権威があると思っていた Nuclear Science and Engineering というアメリカ原子力学会の雑誌に投稿した。1999 年のことである。ところがレフェリーはなかなか内容を信じてくれない。追加的なデータを色々要求され、それを論文に書き込んでいくうちに出版は 2001 年になってしまっていた¹⁾。その後申し込んだ国際会議の発表が学術雑誌への発表より先になってしまった。この発表の内容について、米国で友人に話したところ、エドワード・テラーが似たような論文²⁾を発表していることを教えてくれた。この論文は Nuclear Science and Engineering の参考文献に加えられた。この論文こそ、その後、Travelling

Wave Reactor のもととなる論文である。

その後しばらくして、日本の原子力関係のシニアが集まる勉強会があり、そこで発表するように要請された。その時たまたま Nuclear News の書評欄で見つけた「The process demonstrated well the three stages of scientific discovery. In the first stage, people call your idea crazy and say you'd be a fool to propose it. In the second stage, with the evidence mounting, people say it just might be correct. By the time you have enough evidence to offer proof, you are at the third stage, when people say the idea is so obvious that of course it's true, any idiot could have seen that.」という文があったので、聞かれた人に、CANDLE 炉は今どのステージにあるか訊ねてみた。もちろん全ての人がファーストステージだと答えられた。それからかなり経ち、その時間いただいた方にたまたま会ったので、同じ質問を試してみた。やはりファーストステージだと答えられたので、少しがっかりした。ビル・ゲイツのことがあったので、今一度聞いてみる必要がありそうである。Evidence ではなく、ビル・ゲイツの資力によるというのが気になるのだが、セカンドステージ当たりに来ている気がする。但し、サードステージにはまだまだ道遠しだと思っている。

その後、東工大では 21 世紀 COE プログラム「世界の持続的発展を支える革新的原子力」(COE-INES) が採択され、CANDLE 炉は目玉テーマのひとつとなった。またこのプログラムが終了した後でも、COE を受け継いだ革新的原子力研究センターで研究が継続された。

ビル・ゲイツ登場

第 2 回 COE-INES 国際シンポジウム INES-2 を 2006 年に開催したとき、エドワード・テラーは既に亡くなっていたが、彼の共同研究者ローウェル・ウッド博士を招き、発表してもらった³⁾。エドワード・テラーの発表から 10 年が経っていたが、ほぼ同じ内容であり、彼らの仕事は一発花火だったのかと思った。しかし、その後しばらくして発表者から招待のメールを受けとった。但し場所はリバモアではなくシアトルであった。私は当時忙しくて招待に応じることはでき

なかった。しかし、2009 年の 5 月に東京で ICAPP 会議が行われた時、私の旧友の中国アモイ大学のニン・リー教授からテラパワーの CEO であるジョン・ギルランド博士を紹介された。そこで、エドワード・テラー等の提案していた原子炉はテラパワーでウッド博士等により TWR として研究開発されていることを知った。しかもビル・ゲイツがスポンサーであることもわかり、新しい原子炉の開発は中国で行うという考えまで聞くこととなった。アマチュアの雰囲気の色濃い集団ではあるが、足らない部分はいくらでも優秀な人を呼んでこられるし、こういうシステムこそ CANDLE 炉の実現に必要なものであると確信した。このような訳で、コンサルタントの申し出にも快く応じたわけである。

コンサルタントの手続きは東工大の内部手続きで長い時間がかかってしまい、正式にサインしたのは 2009 年の 7 月も終わりになっていた。手続きも済んだので 9 月になってテラパワーを訪問した。行く途中母校であるカリフォルニア大学バークレー校に立ち寄った。ここでは CANDLE の講演をすることになっていた。日本にはまだ届いていなかったが、アメリカでは米国原子力学会誌(Nuclear News)に TWR が大きく取り上げられていた。この記事には私の名も CANDLE の名前も出ていなかったが、多くの人が CANDLE と TWR が同じような原子炉であることを知っていたらしく、タイトルは CANDLE であったが、講義室には多くの聴衆が詰めかけていた。

テラパワーの研究所はインテリクチュアル・ベンチャーズと同じところにあったが、大木と深い緑に囲まれた高級感の漂う場所にあった。テラパワーではギルランド博士だけでなく、ウッド博士や私の良く知っている MIT の研究者や卒業生が仕事をしていた。初日の午前中、集まった人たちに CANDLE 炉の話をした。その日の午後と翌日には TWR の説明やテラパワーの案内をしてもらった。

11 月になってリー教授から急に中国に来てほしいというメールが届いた。ビル・ゲイツやギルランド博士等が 11 月初めに中国を訪問したということで、彼らが回った機関を私にも回ってほしいということであった。とりあえず都合を付けて 11 月末中国に向かった。中国原子力研究所(CIAE)、中国核工業集团公司(CNNC)、国家核電技術公司(SNPTC)、清華大学、

上海核工程研究設計院(SNERDI)といったところを回り、まずリー教授が TWR について話し、その後私が CANDLE について話すというものであった。いずれの機関でも若い人が沢山集まって聞いてくれた。北京の CNNC における会議では成都にある研究所で働いている私の教え子が来ていたのにはびっくりした。本人もただ北京に行けといわれただけで私が話をすることは思ってもいなかったということであった。

この時リー教授から送られてきていたインターネット記事が文頭で書いた記事である。

現 状

国際会議で CANDLE について発表すると、以前では殆ど聴衆はいなかったのだが、今では部屋にあふれるばかりにきている。ビル・ゲイツ効果であろう。私のやっていることは今までと殆ど変わらない。もっと派手にやれという人も多いが、私はこれで良いと思っている。私としては、革新的な原子炉が積極的に研究されるようになるのが嬉しい。TWR が将来成功したとき、日本で嘗て研究されていた CANDLE という名の原子炉がその元になっているということが多数の人に認識されておればよいと考えている。

参考文献

- 1) H. Sekimoto, et al., "CANDLE: The New Burnup Strategy", Nucl. Sci. Engin., 139[3], 306-317(2001).
- 2) E. Teller, L. Wood, et al., "Completely Automated Nuclear Reactors for Long-Term Operation II", ICENES'96, Obninsk, Russia, 1996.
- 3) R. Hide, L. Wood, et al., "Nuclear Fission Power for 21st Century Needs", Progress in Nuclear Energy 50, 82-91(2008).