

長計についてご意見を聴く会（第15回）

要 旨

スティーブ・フェッター（メリーランド大学教授）

「The Economics of Reprocessing and Recycle v. Direct Disposal」

・コストだけが大事なファクターであるとは思っていないし、一番大事というものでもないことは承知している。エネルギー・セキュリティの確保、核拡散防止という問題もある。廃棄物管理といった問題も残っている。

しかし、電力業界においては、競争が一段と激化している中で、コストはやはり重要だと思っている。

ここ10年ほどの間に、直接処分比べて再処理をした方がコストが高いというコンセンサスが生まれつつあるが、直接処分と再処理のコストの差は、非常に優位に大きいと考えており、業界にとっても大変負担が大きくなる。かつ、このコストの差というのは極めて長く、75年から100年間は続くと思っている。

・直接処分 対 再処理（軽水炉）

（1）軽水炉で再処理を行う場合、再処理に有利な数字を使って分析をおこなっても、再処理費用が1000ドル/kgかかるとすると、ウラン価格は370ドル/kgにならなければ、再処理と直接処分の費用は平衡しない。

また、現行のウラン価格を参考にして、ウラン価格を50ドル/kgとした場合、再処理費用は420ドル/kgにならなければ、再処理と直接処分の費用は平衡しない。この数値は、六ヶ所再処理工場で推定されている費用の7分の1から8分の1である。

再処理が一番有利になる数字を使って計算したとしても、再処理の費用が上がれば、ウラン価格が相当高くないと平衡しない。

（2）六ヶ所再処理工場の費用については、40年間の操業とし使用済燃料が処理される量を想定して、3100ドル/kgという結果を出している。

また、MOXの処理工場に関しては、資本のコスト、運営のコスト、運転のコスト、それからディコミッションングの費用、こういったものをすべて計算に入れ、加工されるMOX燃料の量を使って計算した（2700ドル/kg）。

・直接処分（軽水炉） 対 再処理（高速増殖炉）

平衡するウラン価格は、軽水炉で再処理を行う場合と変わらない。前提条件として、高速増殖炉は軽水炉に比べてキロワットあたり200ドル高いとして計算し、平衡するウラン価格は340ドル/kgとなった。

また、ウラン価格が現状のように安い状態が続き、高速増殖炉の資本コストが高いままと推定した場合、発電については高速増殖炉の方が高くつくことになる。

・ウラン資源

(1) 軽水炉でも、高速増殖炉の場合でも、ウラン価格が300ドル/kgを超えない限り再処理は有利とならない。一番楽観的な再処理が有利になると思われる条件で計算しても、ウラン価格が130ドル/kgを超えないと再処理は有利とならない。

(2) ウラン価格130ドル/kgまでのウラン資源は、OECD/NEA・IAEAレッドブックによれば1600万トンとなるが、この数字は非常に少ないと思っている。

ウラン価格の低迷から、過去20年間大規模な探査・投資は行われていないが、ウラン価格が上昇すれば、新たに資金が投入され、そうなれば必ず埋蔵が見つかると思う。

「価格が2倍になれば、既知の資源量、あるいは可採埋蔵量は10倍に増える。」というウラン業界に詳しい人物のコメントもある。つまり価格が高くても構わないのであれば、可採ウラン量はさらに増える。

(3) ウランを最も消費したケースでも、1600万トン（既に採掘されてしまったものを含めると1700万トン）を消費するには75年かかる。

我々は130ドル/kgまでの価格であっても、3500～4000万トンはあると思っており、そうすると、原子力エネルギーの規模を最も大きくしたシナリオを想定しても、100年ぐらいはウランが枯渇するという心配はない。

・再処理をめぐる状況について

(1) 米国におけるアドバンスド・フューエルサイクルの研究は、地層処分に関するスペースの確保の観点から、再処理をして高レベル廃棄物だけを埋設することになれば、地層処分場の寿命を延ばすことができるのではないかとということで始まった。しかし、この点には混乱がある。

・軽水炉を使い再処理しても、高レベル廃棄物の地層処分場の寿命を延ばすことはできない。

・再処理によって、地層処分場の容量を拡大する（寿命を延ばす）という効果が

期待できるのは、高速増殖炉を使ってマイナーアクチニドを消費することができる場合だけである。

しかし、高速増殖炉を使った核燃料サイクルは、再処理、燃料製造が高くなるため、最終的な電力コストは高くなる。

- (2) 気候変動に配慮し、カーボンフリーな将来のエネルギー源を考えていくと、原子力発電の役割はとても大事だと思っている。にもかかわらず、今、米国では再処理と高速炉に対するプッシュがかなりあるので、使わなければいけないはずの原発の路線を誤るのではないかという心配を持っている。MITの研究者も同じようなことを述べている。将来原発をきちんと利用し活用していくためには、一番安いからこそワンスルーのサイクルを維持していくのがベストだと考えている。

米国では、原子力発電所に使用済燃料が貯まっており、さらにユッカマウンテンの貯蔵量にも限界があるため、このように原子力利用を維持していくためには、必要な処分場を確保できるのかという問題がある。そのため、再処理を行い高レベル廃棄物だけを埋設して、今の処分場の寿命を延ばしていくべきという主張と、新しく処分場を増設すればよいという主張が従来からなされている。しかし私は、政治的圧力によって、第2処分場を作るか、ユッカマウンテンを拡大することになると考えている。

- (3) 日本がエネルギーの安全保障を非常に心配しているということは理解している。だからこそ、限られたウラン資源を効率的に活用したいという考えもわかっている。

しかし、ウラン市場はこの数十年で変わってきている。当面は十分にリーズナブルな価格での調達に心配はない。

- ・価格自体が下がっている。

- ・供給国が増えてきている。(米国に輸出している国だけでも、カナダ、オーストラリア、ロシア、カザフスタン、ウズベキスタン、南アフリカ、ブラジル)

それでも、日本がセキュリティーに心配があるというなら、石油のようにウランに関しても戦略備蓄を考えればいい。再処理よりは安くつく。

- (4) 米国にとって最も重要なことは、(個人の考えだが)核拡散の問題だと思う。そのため、米国では、全世界的に再処理をしない方がいいという方向になり、ワンスルーが採択された。

懸案事項としては、

- ・再処理によるプルトニウムの量が増えていること。
- ・プラントにおいて、I A E Aの保障措置の基準を満たすことができないのではないかということ。六ヶ所のような最新設備であっても、どうしても計量不能、在庫量のズレは避けられないと思う。
- ・国によって差別的な政策をしておくことは長期的に維持できないと思う。つまり、日本はよくて韓国はダメというのでは、不快感、不和、あるいは緊張感が続いてしまうと思う。

長計についてご意見を聴く会（第15回）

質疑応答編

スティーブ・フェッター（メリーランド大学教授）

「The Economics of Reprocessing and Recycle v. Direct Disposal」

- (1) 今回、先生が行われた研究の目的についてご教示いただきたい。DOE（米国エネルギー省）が、AFCI（Advanced Fuel Cycle Initiative）を始めようとしていることに対する警告なのか、あるいは日本の再処理工場の操業が近くなったことに対して、それを止めようとしているのか。

[回答]

今回の研究は、前政権時代にDOEからの資金を得て行ったものです。研究は、あくまで米国の状況に鑑みたものであり、我々も前政権の者も、六ヶ所村で運転開始などは全く関係がなかったと思いますし、日本での様々な議論に対して影響を及ぼそうという考えはなかったと思っています。

資金を出した政府の側も、再処理についてさまざまな動きがあるので（Generationにおいても、AFCIにおいても高速炉に関する研究がどんどん進んでいた）、いずれは再検討を求められることは予想していたようです。

我々の研究として、再処理はやめた方がよいのではないかという考えはありましたが、我々のレポートには六ヶ所に関する言及はほとんどありません。今回は、日本の皆さまの前でお話しをするので、日本の話をした方が分かっていただけと思い、あえて六ヶ所の事例を使いました。

- (2) 米国は、1人あたりのエネルギー消費量は日本の2倍あり、人口も2倍であることから（単純には）日本の4倍のエネルギーを使用していると考えられる。しかし、米国は、そのエネルギーの約75%を自国で賄っている。さらに、これにカナダ、メキシコといったNAFTA（北米自由貿易協定）リージョンを加えると、ほぼ100%自給できる。

しかし、日本のエネルギー自給率は4%しかない。そこで、日本は、再処理によって、これを少しでも高めようと努力していることに対して、単にコストだけで批判されているわけですが、これについて何かご意見はありますか。

[回答]

米国は、全体で見れば確かにエネルギーは自給ができているかもしれませんが、原

油に関しては40～45%は輸入している。ですから、日本にとってのウランの重要性より、米国にとっての石油の方がはるかに重要です。国外からの供給に依存しているということで、石油ショック的なものに対する脆弱性があるからこそ、戦略的備蓄が始まった。ですから、ウランの価格高騰や供給途絶といったことに対して不安があるなら、石油のように備蓄を考えることもおかしくないと思います。

- (3) 中国では、2020年までに28基の原子力発電プラントを建設するとの計画があり、これらを40年間運転するだけで、ウラン消費は世界の確認埋蔵量の4割になるという試算もある。そういったことから、エネルギーセキュリティの観点から、ウラン資源がどれだけあるかということを考えれば、自国のエネルギー自給率を高めるために、核燃料サイクルも一つの重要なオプションとして考えておかねばならないと思うのですが、どのようにお考えですか。

[回答]

「埋蔵量」に関しては、確認済みのものに重点が置かれているのではないのでしょうか。現在、私は、90を超える複数の鉱物資源について、過去100年にわたる価格、埋蔵量、現行生産量を比較していますが、全てに対して確認済みの量も増え、かつ、ほぼ全てに対してキロあたりの値段がほぼ一定して下がり続けている。

その理由は、資源に関して使用するはるか前にたくさんあると証明しても、経済的にプラスにはならないためです。また、採掘技術が向上し、生産効率が高まっているために価格が下がっています。この傾向は当面は続くと思われるので、将来のウランに関しても、これが当てはまると思う。例えば50年先を考えれば、海水からウランを抽出するという技術も可能性が高いと思います。

[コメント]

埋蔵量が年々増えているということ、また価格が安定しているということですが、例えば、鉄やアルミはリサイクルされたもので市場価格が決まっているわけで、これを原子力に当てはめれば、再処理によってプルトニウムが作られるため、ウラン価格もそう上がらずに済むということも考えられる。

- (4) 廃棄物の処分場のコストの問題について、OECD/NEAで各国の比較を行った時、土地代、人件費、検査費用など全てが高いことから、日本だけ突出して高かった。このように処分場のコストは各国の事情によって相当違うので、本試算がすべての国に当てはまる訳ではなく、そういうことも考慮して評価しなければならないと思いますが、いかがですか。

[回答]

原子力技術全般に関して技術の進歩が期待できると思う。全てに関して技術が進展して、コストも下がるという可能性が高いと思います。ピューレックス技術に関しては、現在の技術成熟度から、今後コストが下がる理由はないのですが、ただ、興味深いのは、英国、仏国でのピューレックスを使った分離と日本の六ヶ所のコストは余り変わらず、おそらくキロあたり2000ドルが妥当だろうと思われる。

今回の計算には、1000ドルを使っているが、これは、将来は下がるだろうと考えてのことです。

[コメント]

ピューレックス法も低除染の簡素化したものでコスト削減に向けた研究開発を行っている。ペーパーワークだけでなく、技術開発の第一線の現状も良く調べて評価された方が良いと思う。

- (5) 核不拡散の問題で六ヶ所再処理工場はいろいろと心配事があるということでしたが、六ヶ所再処理工場では、IAEAのフルスコープのセーフガードを受け、プルトニウムの管理を非常に厳格に行うことにしており、またプルトニウムが単独で取り出せるプロセスはないわけですが、どのようなことを気にされているのですか。

[回答]

核拡散に関するコメントについては、私個人の考えであり米国政府の考えではありません。よろしくお願いします。

その上で、私は、日本に関しては、再処理を行ったとしても核拡散に対する不安は全くありません。中国、韓国、台湾など各地を回り講演をしますと、行く先々で、なぜ日本だけプルトニウムを分離しているのかと問われます。米国はなぜ日本だけ許しているのかという質問は、答えるのが大変難しいです。

日本がIAEAの保障措置に関してもNPTに関しても、本当にきっちりルールを守っていることはよく承知していますが、どんなにまじめに取り組んだとしても、どうしてもインベントリーの差は出てくるもので、それが記録上の差であったとしても、他の国からすれば「どうなったのか」と聞かれることになります。

- (6) リサイクルした場合としない場合のコスト差は、約10%ということでしたが、この10%を現在の日本円に換算すると、kWhあたり50銭です。そうすると一般家庭の1ヶ月の負担は150円ぐらいであり、石油価格の変動などに比べて、かなり小さな値ではないかと思います。これによって、日本におけるエネルギーの安定供給、あ

るいは廃棄物の環境影響が低減されるのであれば、十分ペイバックできると考えている訳です。米国の場合は、この点が大きな損失になるとお考えなのでしょうか。

[回答]

コストの10%の差は大きいと思います。この10%の差で原発が他の発電方法に勝つか負けるか決まる可能性が大だと思います。実際、米国は非常に自由化されているので、発電事業者としても10%を追加しなければ発電ができない方法を選びたいという業者はいません。

念のため、私の立場は反原発ではありません。原発をきちんと利用し活用していくためには、一番安いからこそワンスルーを維持していくのがベストだという考えです。

(7) 前政権の時に援助をもらってスタディされたということですが、現政権はこのレポートをどのように評価しているのですか。

[回答]

ユッカマウンテンは7万トンというキャップが設けられているわけですが、理論的には12万トンまで拡大可能な状況になっている。もし12万トンに引き上げられれば、現在全米で運転している全ての原子力発電所がさらに60年間操業を続けたとしても、全ての使用済燃料を埋設可能な容量になります。

一方で、原発をこれ以上増やすと、ユッカマウンテンだけでは不十分ということで、第2のユッカマウンテンを見つけるか、新しい技術を開発してユッカマウンテンにもっと詰め込むことができるようにするというのでAFCIが始まったわけですから、今回のスタディは、もともとは前政権の当時から派生した研究ということになります。

90年代の初めから、こういう視点は米国の政権にはありました。そして同じ頃、今回のスタディに関連したレポートが出ており、核種変換したとしてもメリットはないという結論が出ています。それ以降ディベートは継続中で決着はついていません。

(8) 再処理をすると、マイナーアクチニドが出て廃棄物の量が増えるので、ワンスルーがいいということなのですか。

[回答]

現在、米国で高速炉サイクルを支持している人たちが気にかけているのは、ウラン資源の枯渇ではなく、第2処分地を探すことが大変過ぎることだと思いますが、これは次の2つの誤解がもとになっていると考えています。

- ・高速炉とそれを使った核種変換についての追加コストが受け入れられるという誤解。一体誰が投資をするのか、誰がやるにしても政府の支援がかなりないといけないはずです。
- ・第2処分場を立地することに比べて、複数の再処理工場をつくって多くの高速炉を置く方が政治的に簡単だという誤解。ネバタにはまだ廃棄物処理に最適な土地がたっぷり余っていて、政治的にはその方がやりやすいという考えがある。

(9) 多くの国がウラン供給国になったということでしたが、実際のウラン市場は数社で握られている寡占化の状況であり、必ずしもウランの入手が容易になったということではありません。

また、レッドブックにある1600万トンの内、1000万トンは調査されていない単なる予測です。そういう根拠のないことに日本のエネルギーセキュリティの将来をかけるわけにはいかないと考えているわけですが、何かご意見はありますか。

[回答]

ウラン資源が600万トンとしても、現在のウラン消費量の100倍あることになります。また、どの鉱物資源に関しても、現在の生産高は、以前に確認された資源の量に比べてはるかに大きい状況で、どの鉱物資源に関しても現在無くなって枯渇してしまったというものは発生していません。

我々が調べた90の資源のうちの87、つまり、ほとんどについて生産量も増えているし、消費も増えています。しかしそれを上回って確認埋蔵量の方が増えています。他の鉱物資源に当てはまる経済学的な原則と地質学的な原則が、ウランにも適用されるとすれば、ウラン価格が今後上がっていけば、一部の人たちにとってはもっと埋蔵があったというインセンティブは出てくるかと思えますし、それと同時に抽出、採掘の技術も向上するというので、ウランに関しても同グレードのものをもっと安く採ることができるようにもなると思えます。

(10) 東京大学の山地教授が行ったシミュレーションでは、CO₂を550ppmに安定させようとする、ウランが現在の確認埋蔵量の3倍あるとしても、将来はFBRを導入しなければならないということでしたが、この結果をどのようにお考えになりますか。

[回答]

先ほど示したIIASAとWECに関するグラフの中の2つは、CO₂が550ppmに安定化したという想定です。ただし、全てを原子力とした想定ではなく、原子力も

化石燃料以外のオプションとし、他に風力、太陽エネルギー、バイオマスやCO₂を隔離、安定化させる技術を使って、リーズナブルなレベルにCO₂を安定化させることは可能というシナリオです。

また、ウラン資源に関しては、確認済みの量の3倍を超える量が実際にはあると思いますし、技術の発展などにより実際に抽出可能となる量はもっと大きくなると思います。

(11) 高いウランをどんどん使うことになれば、電気事業者は、電力自由化のもとで事業が継続できるのでしょうか。50年先はどうあるべきとお考えですか。

[回答]

私が「サイエンス」に発表した短い論文で、ウラン価格は、この20年間非常に低い水準にあり、仮にウラン価格が上昇して、例えば、80ドル/kgになった場合には、かなり活発な投資活動が始まり、そうすれば埋蔵量が増え、確認量も増えてくるはずであること。また、CO₂の排出450～550ppmに抑えるための将来のエネルギー供給のシナリオも想定しており、そこでは原子力発電は重要な役割を果たし、CO₂の削減分のおよそ3分の1が原子力発電に帰属する。と発表しました。

私はこういうことが望ましいし、その実現性は高いと思っています。ウラン量は130ドル/kgまでのものを使うとして、向こう100年間ワンスルーで消費するウランの量を考えても、今確認できている量で十分です。

(12) 例えば、石油価格には政治的、軍事的、技術的と様々な要因が入るわけで、コストはその一部であるという認識をいつも持っていなければならないわけです。そこで、ウランの供給曲線に関してコストと資源のリソースについてご説明された時、価格とコストが余り明確に区別されていなかったように思ったのですが。いかがですか。

[回答]

価格は、理論的には限界コストに企業がとったリスクに応じたプロフィットを付加して設定するものです。短期的には理論からの乖離が起こるかもしれませんが、長期的には抽出コストを大きく上回る価格設定にはならないと思います。逆にそうなった場合には、多くの事業者が参入してくるはずで。

(13) 米国は、環境問題を考えると原子力を続けたいが、一方で、現状では処分場を増やし難いという状況にある。つまり、米国は原子力のメリットを認識しながら、今

は、答えがないということなのですか。

[回答]

今から、ユッカマウンテンの貯蔵量（7万トン）のキャップの解除を試みる動きを始めるか、それともユッカマウンテンに続く第2の処分地を探すことを始めるかということになるわけですが、どうしてもという理由が無ければ、政治的に厳しい判断を下すのは難しいことであり、現在、米国はそこまで差し迫った状況にはありません。

しかし、いずれはどうしても必要だと気がつくと思います。その必要が差し迫った時に、一番シンプルでベストで一番安い方法は、ユッカマウンテンの7万トンのキャップを外すか、隣接してスペースを拡大するかの二つに一つしかないと思います。それで、議会での採決がどうなるかですが、上院議員数では、ネバタ州（2人）対残り48州ですから票は取れるのではないかと思います。

実際、ネバタテストサイトがすぐ近くに大規模に存在しているわけですが、詳しい人の話では、そこは、ユッカマウンテン以上に放射性廃棄物の処分に適しているということなので、私個人としても、こういう合理的な結論に行き着くことを期待しています。

【電力中央研究所 鈴木上席研究員のコメント】

- (1) 再処理、リサイクルの方がワンスルーより高いというのは、大体皆さんわかっていたと思います。こういう数字をみると、定量的な評価の重要性が実感できます。原子力委員会は、年頭の所信で述べられていた定量的評価をぜひ行っていただきたい。
- (2) このレポートは、ハーバード大学が米国での経済性を比較して行ったものだが、かなり国際的な数字を使っていることから、世界の原子力にとって大きなメッセージとなっている。この点が大事ではないかと思います。
- (3) 日本における議論をするときも、日本の状況に応じた分析がまず大事ですが、特に、六ヶ所再処理工場の建設が既に終わっていること、廃棄物処分場はこれからということで、米国とは条件が違う。それから、エネルギー安全保障の問題についても日本独自の様々な観点があり、今日の議論でも、ウランの枯渇、供給不足、寡占化、価格などが取り上げられているが、日本にとって何が一番不安材料なのかをきちんと議論しなければならない。
- (4) このレポートに関連して、マシュー・バーン氏、フェッター氏も含めハーバード大学と東京大学のグループは、米国と日本が、いつまでもワンスルーか再処理か

を議論をしているのではなく、今大事なのは何かを議論しようということから、中間貯蔵の重要性についての研究を行っています。この研究は、今日ご紹介いただいたレポートより後から始まり先に終わりました。

今日、フェッター氏は中間貯蔵の重要性については、余り触れられていませんが、おそらく同意していただいていると思います。