



宇宙のエネルギーの安全・安定的な活用を目指して

—— 藤家・小澤研究室～原子炉工学研究所 ——



藤家 洋一 教授

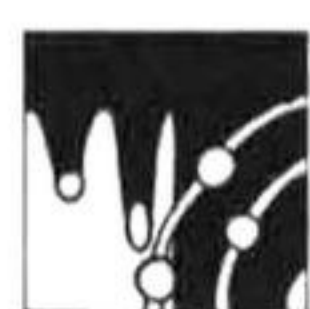
地球上には大昔から、太陽のエネルギーが化石燃料というかたちで少しずつ固定されてきた。現代文明はエネルギーの大量消費の上に成立しているが、化石燃料は限られた資源であり、新たなエネルギー源としていろいろなものが研究されている。

システム安全工学部門（旧ブランケット安全工学部門）の藤家・小澤研究室では、未来の究極のエネルギーとしての「原子力」を人類が安全にかつ安定に使っていくために、原

子力システムの安全性に関するさまざまな研究を行っている。



「原子力というのは宇宙のエネルギーの基本なのです。元素についても中性子の核反応で作られたものが結構ある。これらの宇宙に本当に存在したものを、人類が地球上でどうやって安全かつ安定に実現していくか、というチャレンジが原子力研究なのです。」藤家先生はまずこう語られた。



「安全」についての正しい知識と考え方

(1) 大学で考える「安全問題」

藤家先生のお話は続く。「原子力の歴史は、宇宙の大きなエネルギーをいかに小さくするか、という歴史です。従って、最初の実用は必然的に大きなものになった。エネルギーを一カ所で大量に生産し、大量に供給する発電分野が原子力を最初に実用化したのは、必然的なものだったわけです。これからの原子力利用はもっと幅広く、熱源とか動力源とかいろいろな分野にわたるでしょう。

だから一般に皆さんは、原子力の『安全問題』というと、電力会社が考えているようなものと捉えがちだけど、そういう世間の議論だけを見ると受け止め方を間違える。大学というのは大きくものを見ながら学問体系をつくっていくのが使命ですからね。『原子力の影響を空間的・時間的に制約されたものにする』ため

の技術、そして特に論理について、大学は世の中に対してリーダーシップをとっていかなければなりません。」

(2) 「技術的知見」と「安全論理」

原子力エネルギーが使われ始めた当初より、「原子力の安全性」なるものはさまざまな分野の優れた専門家によって研究が続けられてきた。これらの研究の内容や成果は高度で専門的なものであり、また分野也多岐にわたっている。そのため一般の人はおろか、同じ「安全性」を研究している他分野の専門家にさえも容易に理解できるものではない。

このような広範囲の研究によって今日まで蓄積された技術的知見は、実に膨大なものである。しかし知見が蓄積されたからといって原子力の安全問題が解決するというものではない。そこで、いろいろな知見をど

のように整理し、どのような法則を導き出し、それを基にして何をしたいけばよいのか、といった一連のことを考える拠り所となる思考の方法論が必要となってくる。これが「安全論理」である。

「安全論理」は技術的知見とは表裏一体の関係にあり、この論理を理解するのは研究者にとってとても重要である。なぜなら、これより自分の研究が原子力の安全にどのように役立っているのか、安全の向上のため

には何をやればよいのかを明確に把握することができるからである。それと同時に、原子力施設周辺に住む人々をはじめとする一般の人々にとっても、この論理を理解するのは大変重要なことである。安全について社会の人に分かりやすい見方・考え方を提供できれば、専門的知識を十分に持っていない人でも、専門家の話について一通りの判断はできるであろう。また研究者が一般の人々に安全性を的確に示すことができるの

である。

「原子力は社会性の高いものだから、専門家が何を言っても、安全についての当事者である社会の人々が『不安だ』と考えるようでは、意味がない。」と小澤先生は強調された。「安全論理」は、立場の違う両者の間での共通の尺度・基準となっている。「だから工学的な事ばかり考えているのではなく、社会科学的な観点を足さなければいけない。」



安全解析のための2つのアプローチ

原子力システムは、内部で発生する核反応エネルギーはもちろん、他にもシステムの運用に必要ないろいろなエネルギーを内在させている。これらのエネルギーが異常に放出されたとき、システムの安全性、すなわち放射性物質を環境中に放出しないためのしくみに何らかの影響があることが考えられる。それは、1つ

は放射性物質の易動度（融解することによる、動き回り易くなる度合）の上昇であり、もう1つはシステムの健全性（平常を保つ装置や容器・配管・壁等の設備、異常を押さえるための同様の設備が役割を果たす状態であること）の破壊である。システムの「安全解析」とは、異常なエネルギーがこの2つに与える影響を

検討していくことである。

安全解析の基本的なアプローチの方法は核分裂炉でも核融合炉でも、また非原子力分野でも大きな違いはない。1つは安全設計などで使われる決定論的な評価であり、もう1つは総合的安全評価の分野で用いられる確率論的な評価である。

◇決定論的安全評価——安全設計とDBEs

異常なエネルギーの放出の影響を極力小さく押さえるために原子力システムがあるべき姿については、先に安全論理のところでも述べた。原子炉を設計するときには、その点が十分に実現されなければならない。原子炉は内部の物理現象の性質に基づく自己制御性や、原子炉が必然的に持つ遮蔽性などの「固有の安全性」を持っているのだが、実際に異常時の健全性を実現するためには、ほとんどは新たに人工的な手段を講じて対処しなければならない。このための設備を「工学的安全系」という。（先日の美浜原発事故で作動した、ECCS—非常炉心冷却系もこのひとつである。）

工学的安全系は、安全設計上の最後の砦となるものであり、設計をす

第1事象群	第2事象群	第3事象群
プラズマ過出力 プラズマディスラプション プラズマ加熱系異常* 真空エリア内圧力上昇 燃焼系 (Class1n'ヶガリ) エリア内圧力上昇 ブランケット内温度・圧力上昇 廃棄物貯蔵系内温度・圧力上昇 コイル系異常	真空容器内 Class2 RI 移動化 真空容器破損 真空容器内冷却材流入 燃料系 (Class1n'ヶガリ) 破損 燃料系 (Class1n'ヶガリ) 内冷却材流入 燃料系 (Class2n'ヶガリ) 内冷却材流入 ブランケット内 Class2 RI 移動化 ブランケット破損 冷却系異常 廃棄物貯蔵系破損	真空容器内Class2 RI移動化+真空容器破損 真空容器内Class3 RI移動化 燃料系内Class2 RI移動化+燃料系破損 ブランケット内Class2 RI移動化+ブランケット破損 格納系内冷却材流入 廃棄物貯蔵系内Class2 RI放出 計6事象 格納系内圧力上昇
計8事象	計10事象	

第1事象群から第3事象群にいくにつれて、事象は重大なものとなる。



- Class : R I (放射性同位元素) の量によるレベル区分
Class 1 < 10⁷ < Class 2 < 10⁹ < Class 3 (単位はキュリー)
バウンダリー : ある区域を遮蔽する隔壁
(Class I バウンダリー → 内部に Class I RI を持つ区域のバウンダリー)
ブランケット : プラズマの周囲を囲む隔壁の1層。ここでトリチウムと中性子を反応させてトリチウム (核融合 D T 反応の反応物) を増殖する。

ITER (国際熱核融合炉) のDBEの例

る上ではっきりとした見通しがたつものでなければならない。従って、この設備の設計に関する安全の評価法は非常に保守的なもので、異常なエネルギー放出に対抗し得る設備・施設がきちんと装備されているかを検討し、それらが完動し得る限り、「設計で想定されたレベルの事故」の影響が施設外へ広がるのを防ぐことができる、とするものである。

ここで問題となるのが、設計ではどのような「事故」を想定すればよいのか、ということである。自動車事故などと違い、原子炉の「事故」対策は、過去の多くの事故の統計の中から導き出す、という手法が使えない（使うようなことになってはならない）。そもそも「事故」というものは常に不測の事態であり、その無限にあるシーケンスを設計時に1つ1つ想定しておく、などというのは不可能であり、ナンセンスな話である。また、過去に起こったある特定

の事故の詳細のみに着目した設計をするのは、逆に視野を狭めることになり、危険かも知れない。この矛盾を解決するために考え出されたのがDBE(Design Basis Event: 設計ベース事象)である。

DBEは事故対策以外にも広く用いられる考え方である。DBEとは一種の仮想された事故シナリオやその支配因子であり、そのシナリオに従って安全対策を立てておけば、現実には発生する可能性のある無数の事故や異常現象に対して広く有効な対策がとれるように、人工的に考え出された事象である。これはあくまで設計用に想定されたものであって、実際にこのような異常が発生することを前提とはしていない。設計上特徴的な現象を取り上げ、その最も重大な結果を引き起こすようなケースをつないでいけば、より多くの現象を代表できる、と考えるのである。そして全てのDBEで包絡される範囲が、

設計の責任範囲となるわけである。

さて、設計上の安全は「安全設備がきちんと動作する」ことを前提としているのだが、これを実現するために、設計は多重性・多層性・独立性が要求される。多重性とは、ある機能を果たすために同じ系統が2つ以上あることであり、どれか1つが機能喪失しても機能を果たすことができる。多層性は多重性と違って、1つの機能を果たすのに性質の違う系統が2つ以上あることで、多重性より故障に対して強い。独立性とは、あらゆる2つ以上の系統が同一の原因によって機能喪失することのないよう、あらゆる面で系統を分離することである。これらがきちんと満たされていることを確認するために、任意の1つの系統の故障を仮定してもあらゆる機能が動作するかどうか調査する。これが「単一故障指針」と呼ばれるものである。

◇確率論的安全評価——確率とリスク評価

「原子力の安全」における設計の役割は大きい。しかし設計で完璧に手を尽くしたからと言ってそれが即安全確保につながるわけではない。いたずらに重装備になってしまった工学的安全系は保守点検を非常に困難にし、結果として安全性を低下させてしまうかもしれない。「原子炉の安全」=「工学的安全系」と考える人も多いが、工学的安全系は、異常発生を予防できるような運転（保守点検も含む）の容易な設計があつて、ちょっとした異常を早期に発見して対応する監視系・安全保護系があつて、その上に最後の切札としてあるべきものである。ちょっとした異常が工学的安全系までいかなければ止まらないような原子炉は、周辺環境中に放射能を放出する可能性が低いからといって、信頼性（ひいては安全性）

が高いとはとても言えない。このように、原子炉に携わるいろいろな段階の安全追求を有機的に結合して、「合理的安全」につなげるような総合的な安全評価を行わなければならない。

総合的な安全評価を行う際には、「安全目標」が定められる。まず安全目標の理念とも言うべき「定性的目標」があり、それを受ける形で具体的な「数値的指針」があるわけである。この安全性の度合いを測るものさしとして「リスク」を導入する。リスクとは、確率論の期待値のように、ある出来事の発生確率とその影響の大きさとの兼ね合いで表されるものである。事故の原因となり得る事象の発生確率を求め、それを設計の範囲内に押さえるためのあらゆる安全系を挙げて、それぞれが正しく

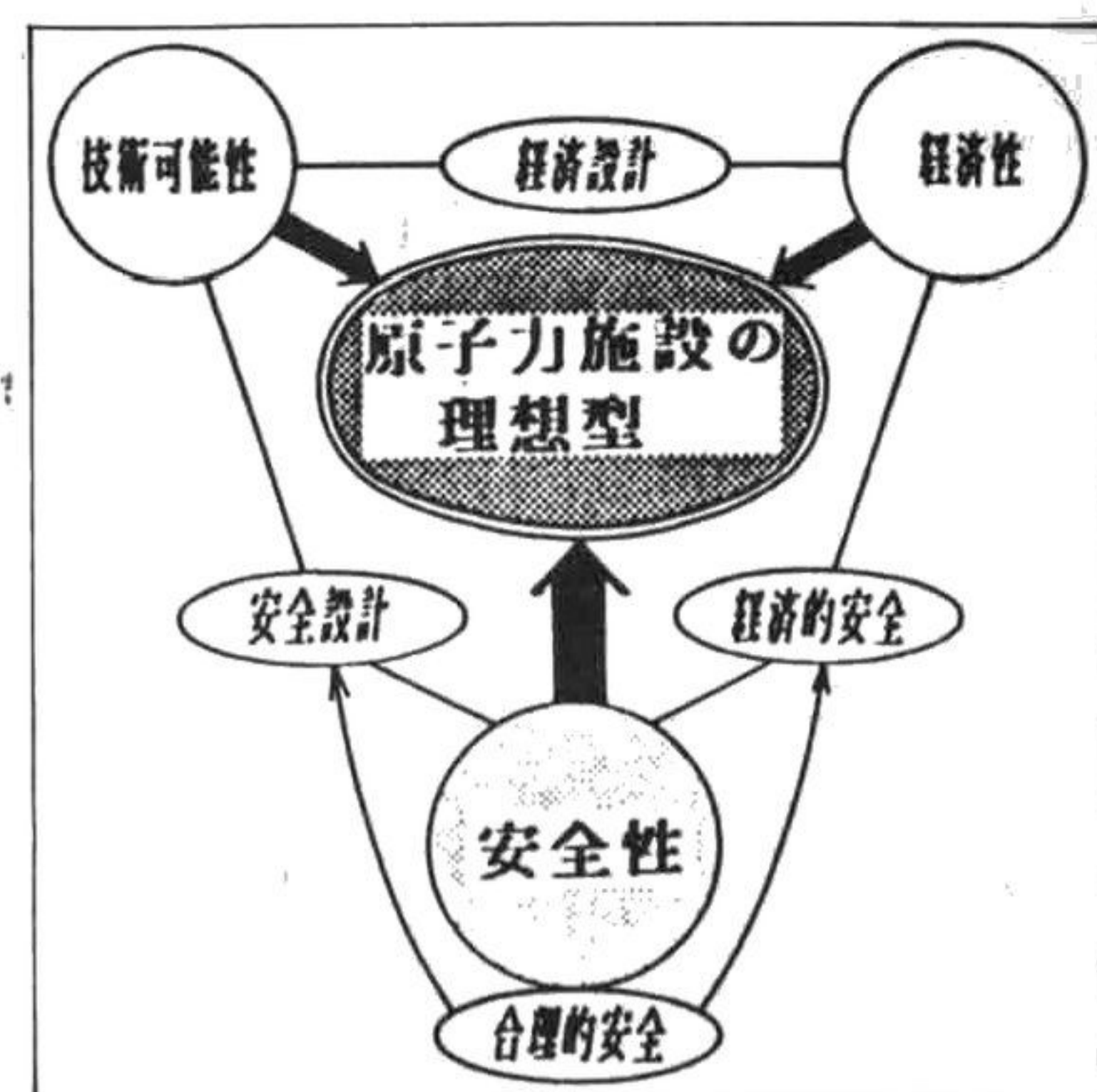
動作するか否かを組み合わせて重大事態に至る組合せを選びだし、その起こる確率、そしてリスクを計算していく。

確率の計算においては、安全系の動作確率の拠り所となるデータベース

このような各種の事故事象に対応させた解析手法をフェーリュア・パス・アプローチという。これに対して、「システムが安全であるために守るべきポイントは何であるか」を追求する手法が、サクセス・パス・ア

スの充実が不可欠であり、また不確実なヒューマン・ファクターをどう扱うという問題もある。しかし、安全性がどれだけ良くなったか、といった相対的評価を行う際には非常に有用である。

プローチである。これは合理的安全の追求、そして経済性や技術可能性と高次において融合した「原子力施設の理想型」の追究に欠かせない新しい研究方法であると考えられている。



原子力施設の理想形



安全の面からみた将来の原子炉

現在日本の商業用原子炉は、全て軽水炉である。軽水炉では、核分裂生成物（FP）には半減期の非常に長い高レベルの放射性物質が多く含まれていて、「原子力の影響を時間的に制約されたものに」するようにはできていない。藤家先生も「軽水炉は人類が最初に実用化した原子力ということに意義がある」と言っておられた。超ウラン元素や半減期の長い元素を作らない、作ってもより半減期の短いものに変換できる、そういう原子炉が次世代の原子炉となる。現在研究が進められている高速増殖炉や核融合炉は、その先鋒となるポテンシャルを持っている。

中性子のエネルギーの高い高速増殖炉は、核廃棄物を核変換して「消滅処理」する事ができ、またウラン

を燃やしてエネルギーを取り出しつつ、新たな燃料としてプルトニウムを造り出すという「増殖」が可能である。核融合炉はまだ実用化には時間がかかりそうであり、また現在の技術ではDT反応で放射性物質トリチウムを用いなければならないのであるが、将来的に見ればポテンシャルの高い有望なエネルギーである。また自己制御性に優れた、分散型エネルギー源として開発が進んでいるのが、「高温ガス炉」である。これは高温熱源として化学工業などに利用することも可能である。「原子力が持っているポテンシャルに向かって、正しい技術開発をしてゆくことが一番重要。そういう夢は原子力が一番持っていると思う。」と小澤先生は語られた。

現在、研究室では主に核融合における安全性の研究が行われている。前にも述べたように、安全の考え方は何であろうと同じであるのだが、作られるシステムが全く異なるものであるので、設計や解析には新たな手法を導入しなければならない。

特に原子炉に特有な過酷環境について、いろいろな実験を行なっている。例えば高速増殖炉において、異常エネルギーの放出の際、急激に膨張した燃料物質などの気泡が圧力容器に与える力の影響が、きちんと容器内部に収束するかどうかを明らかにしなければならない。また核融合炉において、不安定なプラズマが隔壁に与える超高温の影響を調べる実験も行なっている。

藤家先生は、週末の多くを原子力についての講演に費やしているそうである。先生は、「電力会社の人より、我々大学人のしゃべる方が聞いてくれそうな感じがするでしょう。」と言っておられたが、なかなか世間に伝わりにくい、と感じることも多いそうである。

最後に、このように非常にご多忙の中、私達に原子力の将来性を熱心に話して下さった両先生方、そして私達を和やかに迎えてくれた院生の方々に深く感謝します。

(熊野)

(なお今回の取材でお話を伺った小澤由行助教授は、都合により3月いっぱい本学を退官されました。)