

2012年度 現代資本主義論

小倉利丸

ogura@eco.u-toyama.ac.jp *

2012年4月26日

3 事故論 (その2)

前回は、福島第一原発が津波に襲われた直後に政府がとった対応の問題点を中心に検討を加えた。事故の拡大は、直後の対応の妥当性いかにによって大きく変わってくる。事故の深刻さを知りながら、政府が把握していた情報を住民たちに通知することを怠ったといえる。この事故の重大性を住民に周知させなかった問題は、被曝と健康被害の問題として後に議論するが、極めて重大な政治的な誤りであった。^{*1}

これまでも原発の危険性に警鐘を鳴らしてきた作家、広瀬隆は「東日本の太平洋沖で大きな地震が起こって、原発が炉心溶融を起こした。事実を煎じつめれば、このことにつきます」^{*2}と端的に指摘しているように、炉心溶融がすべての重大事故と収束の見通しがたたない放射能汚染の原因である。東日本大震災では、多くの火力発電所も被災したが、すべて夏までには復旧していることを考えれば、原発の重大事故は、他の発電施設とは比べものにならないほど深刻な事態を招くのだということを改めて確認しておく必要がある。

今回は、原発固有の深刻な事故の原因となる「炉心溶融」に着目して、次のような論点を検討する。

- 核燃料の危険性は、あらかじめ専門家や政府によって把握していたのかどうか。
- この危険は、技術的に回避可能なのか。
- この原発に固有の技術と経済・社会システムとはどのような関わりがあるのか。

核燃料事故は、そもそも現在の技術では解決できないレベルの危険性なのか。以下で述べるように、核燃料(燃料棒)の危険性は、原発の開発当初から十分に知られていたにもかかわらず、十分な対応がとられなかった。また、この危険性と経済コストとの間には考慮すべき重要な問題があった。

原発事故のなかでもシビアアクシデントと呼ばれる事故は、多くの場合、炉心溶融に伴う事故である。炉心溶融のために水素爆発が起き、高濃度の汚染水が生じ、原子炉そのものと原発の敷地が直ちに人命に関わるほどの高い汚染にみまわれた。^{*3} 原発が何らかの原因で物理的に破壊されて原子炉が正常な状態を維持できなく

* 携帯 070-5553-5495

*1 チェルノブイリ原発事故でも当時のソ連政府は地元住民に事故の重大性を伝えなかった。その結果、数年後から子どもたちを含めて急速に甲状腺癌など様々な疾患や障害が増えたことが知られている。

*2 広瀬隆「福島原発同時多発事故から何がわかったか」、エントロピー学会『原発廃炉に向けて』、日本評論社、2011年

*3 福島第一原発の4号炉は炉心溶融を引き起こしていない。震災当時停止していたが、燃料プールに大量の燃料が保管されており、この燃料の冷却が問題となる。4号機も水素爆発したが、これは4号機由来の水素によるのではなく3号機から流入した水素によるものとみられている。4号機は大量の核燃料を蓄えており、事故で脆弱になった燃料プールの耐震性にも危惧がもたれている。

なったばあい、炉心溶融を引き起こすことがある。これは、地震。津波などの自然災害が引き金になる場合もあれば、人的な操作ミス、老朽化による劣化、設計・施行ミスなど様々である。311 福島原発では津波、地震が引き金になっていることから、自然災害にのみ注目が集っているが、原因は多様でありうる。今回は多様な原因から一つの深刻な結果、炉心溶融に帰結するということから、この炉心溶融そのものに焦点をあててみたい。

3.1 炉心溶融とは

前回述べたように、冷却水が注入できないと、圧力容器の水が蒸発して炉内の核燃料を覆っている水の水位が下り、圧力が上昇する。原子炉内の圧力が 70 気圧を超えて設計上の限界を超える場合には、放射能を含んでいても蒸気を外に出すことになる。

通常は、燃料棒は水に浸されており、水位は燃料棒より上 4 メートルまでであるが、水の蒸発で燃料棒が露出すると、露出した燃料棒は冷やされず高温になる。たとえ、原子炉が停止していても、原発の特徴は、核分裂が停止した後も核分裂生成物が放射線を長期にわたって出しつづける。この熱を「崩壊熱」と呼ぶ。この「崩壊熱」によって燃料棒の温度が上昇する。

温度が 1000℃を超えると、燃料棒の被覆管のジルコニウム合金（ジルカオロイ）が水蒸気と反応して水素が発生しジルカオロイはボロボロになって破壊され、ウラン燃料が剥き出しになり溶け、溶けた燃料棒が下の落ち、原子炉（圧力容器）の溶接部などから格納容器へと燃料が溶け落ちる。^{*4}

3.2 燃料棒の構造

原発が必要としているのは発電用のタービンを回すための蒸気である。核燃料から生成される熱をコントロールして蒸気を発生させ、溶け出さないように管理するための仕組みが原子炉の内部の燃料棒の構造である。前回の述べたように、燃料棒とは、ペレットとよばれる直径 10.4 ミリ、高さ 10－11 ミリの円筒形に焼きかためたウラン燃料（ウラン酸化物）をジルコニウム合金（ジルカオロイ）の細長い被覆管に入れたもの。燃料棒の直径は 12.3 ミリ、長さ 3.7 メートル、ジルコニウム合金の被覆管の厚さは 0.9 ミリの薄さの細長い形状のもので、これを 60－70 本に束ねて燃料集合体を作る。この集合体が 366－827 体装荷される。（添付した図を参照）^{*5}

発電炉としての原子炉は 1950 年代から開発、実用化へと向うが、原発の深刻な事故に世界的に注目が集りはじめるのは、1970 年代である。米国ではアイダホ国立原子炉試験場での緊急炉心冷却装置（ECCS）の作動実験失敗を契機に米原子力委員会が ECCS についての公聴会を開催する。^{*6}日本では、敦賀原発で働いていた岩佐嘉寿幸さんの被曝裁判、伊方原発の建設に反対して裁判が提起され、原発の安全性が全面的に問われる裁判となった。^{*7}原発に疑問をもつ研究者や市民などによる反原発運動の出発点となったのがおよそ 1970 年代前半である。こうした時代背景のなかで、今から 37 年前、1975 年に、大阪大学の久米三四郎は、「美浜原子力発電所 2 号炉で発生した燃料棒事故」^{*8}という論文で次のように述べていた。やや難解な箇所もあるが、引

^{*4} 井野博満「福島原発事故の原因と結果」、井野博満編『福島原発事故はなぜ起きたか』、藤原書店、2011 年

^{*5} www.tohoku-epco.co.jp/electr/genshi/shiryo/system/03.html

^{*6} 米国の 1970 年代の原発論争については、D. コメイ、D. エブラハムソンほか『原子力発電論争』、大場英樹訳、サイマル出版、1977（原書は 1974 年）

^{*7} 原子力資料情報室『原子力市民年鑑 2012 年版』、七つ森書館、2012 年、吉岡斉『新版、原子力の社会史』、朝日選書、朝日新聞社、2011 年など参照

^{*8} 原子力安全問題研究会編、『原子力発電の安全性』、岩波書店、1975 年。なお久米論文が対象としている福井県美浜原発は加圧水型

用する。

被覆管は、中性子の吸収をできるだけ少なくし、原子炉に経済性を向上させるために、自立性を保つのに必要な、ぎりぎりの限界まで薄くつくられており、現在、PWR の燃料では約 0.6 ミリ、BWR では約 0.9 ミリの厚さである。しかもその材料であるジルカロイは、融点が約 1900 °C で、内部にある酸化ウランペレットの融点や定常運転時の温度より低い。さらにジルカロイの主成分である金属ジルコニウムの、水と反応して水素を発生し自らは酸化物になるという傾向、すなわち金属のイオン化 (酸化) の傾向は、アルミニウムに次いで大きい。それにもかかわらず 1 次冷却水中で頑張っているのは、表面にできた酸化皮膜が丈夫で、その中で反応イオンの拡散速度が遅く、被覆管内部まで反応が目立って進まないだけのことである。したがって、温度の上昇によって拡散速度が速くなると、ジルカロイの酸化も進行する。被覆管の温度が 1000 °C を越すと反応速度は急激に増加し、1500 °C では約 10 分もすると被覆管は完全に酸化され、崩れおちてしまう。しかも、ジルカロイと水との反応は発熱反応であるため、冷却効果が小さい場合には、反応の進行とともに被覆管の温度は上昇を続け、さらに表面の腐食につれてその表面積を増大し、酸化はいっそう促進される。そして、ジルカロイが熔融して粒状になった場合には、反応は爆発的に進行する。また、もし炉心に空気が進入してくるという条件が存在すると、ジルカロイと水の反応によって生成した水素が、空気中の酸素と化合して爆発を誘発し、最悪の事態にいたる。これを要するに、被覆管はきわどい熱バランスによって 1 次冷却水中で形を保ち、大量の放射性毒物を辛うじて防ぎとめているのである。これがまさに綱渡り技術と称せられるゆえんでもある。」

「しかもその過酷さは、原子力発電所の経済性を高めよという要求によって、ますます激化する一方である。すなわち、原子炉を小型化して建設費を下げ、装荷する燃料の量をへらすとともに、原子炉内の燃料をとことんまで燃やすことによって燃料費を下げようすれば、結局、炉心の出力密度を大きくし、燃料の燃焼度をあげるしかない。しかし、それは同時に、より強力な熱流束と放射線束に被覆管をさらすことになる。」^{*9}

37 年前に書かれたこの燃料棒についての構造の基本は、現在でもほぼそのままだ。ここに指摘されているように、経済的な効率性を求めて、被覆管は可能なかぎり薄く作られていること、高温の発熱と冷却水の水流の挟みうちにあう過酷な環境に置かれていること、水素爆発の原因が被覆管の原料であるジルカロイにあることなど、その危険な性質をコントロールすることが要求されるような技術を原発では必要とされてきた。これまでも被覆管の破損による燃料からの放射能漏れは、決して少なくない事故として知られていたのである。こうした危険性がありながらも、原発の開発当初から現在に至るまで、一貫してジルカロイが被覆管の素材として用いられてきた。この事実は、より安全で経済効率がジルカロイに劣らないような代替的な素材が現状では見い出せていないということであろう。

ちなみに電気事業連合会 (電事連)^{*10} のウェブでは次のように簡単な説明がある。

燃料は、「燃料集合体」という形に加工・成型されて原子炉に装荷 (原子炉に燃料を納めること) されます。燃料集合体は次のような過程を経てつくられます。

1. ペレット

燃料の原料は、焼き固められて、「ペレット」に加工されます。

であり、福島第一原発の沸騰水型とは異なるが、燃料棒の基本的な問題についてはこと点は特に影響しない。

^{*9} 久米、前掲論文、p.35

^{*10} 電力会社 10 社からなる啓発、広報団体。現在は八木誠、関西電力社長が会長をつとめる。

2. 燃料棒

ペレットは、ジルコニウム合金でつくられた燃料被覆管につめられます。これが燃料棒です。3. 燃料集合体

燃料棒を束ね、燃料集合体をつくります。燃料集合体の構造や大きさは、沸騰水型炉（BWR）と加圧水型炉（PWR）とで異なります。^{*11}

この電事連の解説では燃料棒の問題点はまったくわからない。地震と津波によって甚大な被害を受けた結果として燃料棒が破損したことは事実であるが、そもそも燃料棒が極めて脆弱で事故を引き起こしやすい環境のなかに置かれているという問題点は、上記の久米の指摘を読んでではじめてわかる。

このような炉心溶融の可能性（危険性）については、1970 年代には米国原子力委員会も把握していた。久米の論文とほぼ同時期に発行された武谷三男の『原子力発電』^{*12}は、廉価な新書版として出版され、非常によく読まれた啓蒙書だ。武谷は本書で、炉心溶融の危険について、次のように指摘していた。

水を減速材に使った原子炉では、たとえ暴走がおこっても水がブレーキの役をして、水のなくなったところで連鎖反応が止ってしまうことを見た。ところが、水は中性子の減速材であると同時に、炉心の熱を外に運び去る役をしている。水なくなると、ブレーキは効くが、同時に原子炉は空焚きの状態になる。

たとえ連鎖反応が止っても、炉心の発熱はすぐには止まらない。核分裂が止まっても、死の灰の放射能による発熱が残る。たとえば電気出力 100 万キロワット、熱出力では 300 万キロワットで運転されていた原子炉は、その連鎖反応が完全に止っても、3 秒後にはその十分の一の 30 万キロワットの発熱を続けており、1 時間後になっても百分の一の 3 万キロワットの発熱がつづいている。こうして、小出力の原子炉ではあまり重大問題とはならなかった放射能による発熱が、大出力の発電炉の場合には大変な熱量となって原子炉を破壊する。

炉の空焚き状態はいろいろの原因でおこるが、冷却水のパイプが切れておこる空焚き事故を追跡したアメリカ原子力委員会の報告をみながら、事故の経過を想像してみよう。

冷却水のパイプが切れて水の循環が止まるやいなや、炉内の水は水蒸気になって急激に切れ口から吹き出し、5－10 秒以内に炉心は空になる。冷却材のなくなった燃料棒は放射能による発熱で毎秒 10 度ぐらいずつ温度をまし、30－50 秒ののちには危険な 1000 度をこえた領域に入る。こうなると、燃料棒のさやのジルカロイは炉内に残った水蒸気と反応して、水素ガスの発生とともに発熱をする。その発熱による温度上昇がさらに反応を進めるという悪循環がおこる。

1 分ぐらいのちに、燃料棒のさやはジルカロイの融点 1850 度をこしてとけはじめ、やがて燃料棒はばらばらぶばって炉の圧力容器の底に落ち込んでゆく。炉心が崩壊し 10－60 分後には、燃料棒が酸化ウランの融点 2800 度をこえてとけはじめる事態がおこるだろうが、その時の状況はさまざまに考えられる。とけた燃料棒の塊りが容器の底にいっぺんに落ち込むことがあると、底にたまっていた水は瞬時に沸騰して水蒸気となり、熔融した塊りを吹き上げて圧力容器をこわすことも考えられよう。

幸いにしてそのようなことがなくとも、容器の底には重量 100－200 トンもの熔融金属塊ができるわけだ。1－2 時間ののちに、金属塊は圧力容器の底をとかして貫通し、外側の格納容器の底に落ち込

^{*11} urlwww.fepec.or.jp/learn/hatsuden/nuclear/nenryoushuugoutai/index.html

^{*12} 武谷三男『原子力発電』、岩波新書、1976 年

む。そこで格納容器にたまっている水との反応が、格納容器を破壊するおそれは十分にある。

上で述べられた事故の様子は、想定されたものであって、実際に起きた事故を記述したものではない。しかし、福島原発事故の経過とほとんど一致している。福島原発事故は、公式見解では、全交流電源の喪失による炉心溶融であるが、上の事例のように冷却水が配管から漏れて喪失しても炉心溶融は起きうる。電源が確保されていても、冷却水が炉心に流入しない場合は様々に考えられるからである。そして、実は、震災と津波が電源だけではなく、冷却水の循環を保持する配管に亀裂などに被害を与えていないかどうかはまだ確認されていない（原子炉は未だに放射線量が高く近づけないからだ）のである。もし地震による冷却材喪失を招くような原子炉などや配管その他に破損などが起きていたとすれば、原子炉本体の耐震性そのものが問題となる。現在の東電や政府の見解は、原子炉本体は地震に耐えたが、非常用の電源が津波で水没したことで炉心溶融に至ったというもののだが、この点は確定されていないのである。

久米論文や武谷の著書のように、炉心熔融の危険性が30年以上前から示唆されながら、根本的な技術的防御がないえてこなかったということは重く受けとめなければならない。久米の論文は、少数の研究者しか目にしなかったかもしれない。（この論文を掲載した『原子力発電の安全性』は富山大学図書館にある）久米論文は、技術的怠慢というよりも、そもそも原子炉そのものに無理があるということを示唆している。放射性物質を完全に封じ込めるということを前提とした技術が原子炉の技術であるとすれば、こうした前提そのものを疑うことが専門家からも指摘されていたのだ。^{*13}

3.3 シビアアクシデントの経済的要因

炉心溶融は技術的なプロセスである。燃料棒の被覆管が破損して燃料が溶け出すような条件が揃えば必ず生じる。この炉心溶融の危険性は燃料棒の構造によって避けられないものであるとみなされてきたが、単に避けられないだけでなく、経済効率性を追求するなかで、より危険な構造にならざるをえないものでもあった。先の久米論文では次のように指摘されている。

原子炉を小型化して建設費を下げ、装荷する燃料の量をへらすとともに、原子炉内の燃料をとことんまで燃やすことによって燃料費を下げようすれば、結局、炉心の出力密度を大きくし、燃料の燃焼度をあげるしかない。しかし、それは同時に、より強力な熱流束と放射線束に被覆管をさらすことになる。」^{*14}

燃料棒の損傷によって原子炉の安全性は大きく損なわれる。その結果、事故に伴うコストは莫大なものになる。

「燃料棒がなんらかの原因で損傷を受けると、燃料棒は変形をおこすか、あるいは破損して内部の放射性物質が漏れるか、あるいはその両方がおこる。平常運転時には、被覆管を洩れ出た放射能は1次冷却水に移り、モニター機器によって検知され、その濃度が除染装置の能力を考慮してきめられている限界値に達するまでに原子炉を停止すれば、環境に放出される放射能の量は、あるレベル以下に抑えられる。したがって、この場合には、除染装置によって除かれた放射性物質が放射性廃棄物の量を増大させることと、除染費用および破損燃料の交換費用（この中には、取り換える新燃料代交換のための原子炉

^{*13} 武谷の著書は、原発への非常に深い疑問を提起しつつも「原子力の平和利用」への期待を捨てていない。「平和利用」論については別途論じる。

^{*14} 久米、前掲論文、p.34

の停止の損害、使用済燃料再処理費などが含まれる)の支出とが、余分な経済的負担となる。燃料費の安さで火力発電と競争しようとしている原子力発電所が、それを目指した燃料設計条件の向上がもたらした結果によって、再びその経済性を脅かされるという矛盾としてあらわれるのである。」*¹⁵

こうして久米は、「原子炉の炉心にある燃料棒こそ、まさに動力炉原子炉の急所であり、その損傷やそれがもたらす事故は、原子力発電所の安全性と経済性を根底からゆざぶる本質的な問題である。」*¹⁶と述べている。

市場経済はシビアアクシデントを的確に回避できるようなメカニズムを組み込むことができるのだろうか。福島事故は、この可能性がないことを証明したといえる。市場経済を前提とした資本の設備投資や技術開発によって、一般論としてシビアアクシデントを回避しようとする場合、シビアアクシデントを回避する技術を選択する方がリスクのより高い技術を選択するよりも資本により高い利潤をもたらすように市場メカニズムが働く、という場合である。しかし、原発を発電炉として選択することを与件としてしまうとすれば、そもそも原発にはシビアアクシデントを回避する技術が不在である以上、上のような市場のメカニズムは作用しようがない、ということになる。

一般に、複数の技術が併存している場合、市場メカニズムに全てを委ねた場合に、最も安全な技術よりも環境などにより大きなリスクを負わせるような技術が選択される可能性がある場合、政府が介入して、最も安全な技術を選択することが資本にとっても最も利潤率が高くなるように市場のメカニズムを調整することは可能である。こうした調整を政府が行なうことができるのは、政府のエネルギー政策が環境や安全への配慮を最優先とするという政治的な選択に積極的である場合だけである。政府が環境と安全を最優先の政策とするかどうかは全くわからない。政府は中立ではなく、近代資本主義の国家の経済的基盤が資本蓄積(経済成長)に依存しているという点からすれば、資本の利害に深く依存する。有権者がリスクが見込まれても経済成長を望めば、リスクの大きい政策を選択することによって、権力の維持を図ろうとするだろう。

*¹⁵ 久米、前掲論文、p.35

*¹⁶ 久米、前掲論文、p.35