

科学

6 | 1981
VOL.51
NO.6

-
- 悲しい現実、これからの研究者のこと 丸山工作
大型加速器の新しい使いみち 山崎敏光
進化の熱力学 杉本大一郎
脳の可塑性 川口三郎
ソリトン物理学の最近の発展 市川芳彦
チトクロム c_2 井口洋夫・八木達彦
原子力発電所の燃料問題 小出裕章
ジョルダン環とリー環 II 佐武一郎
分子生物学の父デルブリュックの死 渡辺 格
日本-イタリア基礎物理学シンポジウム 江沢 洋
敦賀原発事故に関する通産省報告 高木仁三郎
-

岩波書店

原子力発電所の燃料問題

——美浜1号炉燃料棒折損事故を中心に——

小 出 裕 章*

1973年4月に美浜1号炉で発見された燃料棒折損事故を中心に、原子力発電の心臓部ともいえる燃料棒に今日なお懸念している事故の実態を紹介するとともに、原子力発電のもつ安全性の問題点を技術的な観点から解明し、国の審査監督体制にも重大な欠陥が存在していることを指摘する。

1973年4月といえば、すでに8年も昔のことであるが、当時第2定期検査中であった関西電力の美浜1号炉で一つの重要な事故が発見された。その事故は、一つは原子力発電のもつ技術的な安全性という点において、また一つは原子力開発を進めている体制の欠陥という点で重要な問題を提起している。

後者、すなわち原子力開発体制の欠陥というのは、今日の日本の原子力開発がいくばくもしい秘密主義と事故隠しの体制の中で進められているという点である。この事故は、2本の燃料棒が合計170 cmにもわたって折損するという大事故であったが、冒頭に記したように1973年4月に発見されながら公式にその事実の確認がなされたのは1976年12月であった。それも1976年7月に刊行された1冊のドキュメンタリー小説^①にその存在が示唆されていたことに端を発し、国会などにおける半年にわたる追及の末ようやくその存在が公にされるという異様な公表経過を追ったのであった。事故後、折損した燃料棒の破片は日本原子力研究所(以下、原研)での“調査”を理由に発電所外に搬出されたが、強い放射能をもつ核燃料を運搬するための特殊な容器は筆者の勤務する京都大学原子炉実験所にしか当時存在しなかった。当時の原子炉実験所所長であった栗田俊一教授は、事故に関するデータ提供を条件にこの容器を貸し出すとともに、独自に学問的な原因究明を行なうと宣明した。結果、原子炉実験所の研究者を中心として燃料棒折損事故を調査する調査グループが発足し、筆者もその一員に加わった。その調査の過程で明らかになった種々の問題についてはすでにいくつかの平段で公表した^{②③④}が、ここでは1980年3月に公表にこぎつけた上記調査グループの報告書^⑤、および最近の燃料棒事故が示す問題を、主として科学・技術的側面から紹介したい。

美浜1号炉の燃料棒折損事故の概要

加圧水型原子炉(PWR)は、今日世界の原子力発電の

* Hiroaki KOME 京都大学原子炉実験所

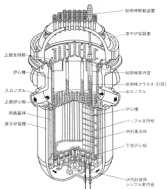


図1 原子炉圧力容器内の構造。

主たる座を占めており、全設備容量の約50%程度を担っている。日本でも関西電力を中心に導入され、現在稼働中の22基の原子力発電所のうち9基はPWRを採用し、設備容量では45%を占めている。

PWRの原子炉圧力容器内の構造を図1に示す。美浜1号炉の場合、炉心部には長さ約3.5mの燃料集合体121体が格子状に配置されるが、個々の集合体は14行14列の燃料棒からなっている。燃料棒は外径10.7mm、長さ約3mであり、肉厚0.62mmのジルコニウム合金製の被覆管の中には直径9.3mm、長さ15mmの円柱形に成形された二酸化ウラン(UO₂)燃料ペレットが、約200個詰められている。このウランが燃える(核分裂する)ときに発生する熱エネルギーの一部を電気エネルギーに変換するシステムが原子力発電プラントである。

燃料棒のもつ基本的な役割は、一つには炉心内で適切な

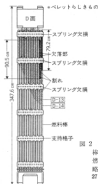


図 2 折曲した燃料棒とそれを含む燃料集合体の概略図。縦方向は約 2 分の 1 に縮小。

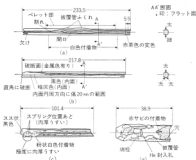


图 3 燃料油箱插片外翻现象照片

表 1 振動機料地の振動状態と同位状態

	計 測 部 分	第2回定時観測時の収量	水田収量
根 葉 部	約100~170 cm (D-13 = 97.7; 89~90.5 cm) (D-14 = 97.7; 77~79.2 cm)	約140~150 cm (D-13 = 97.7; 約86 cm) (D-14 = 97.7; 約57 cm)	約30 cm
こ ぼ り 部	約1,200 g	約557 g(うち、約300 gは根葉部内につまみ取ったもので、検査のため、原形に輸入)	約679 g

注 ベレットのうちの約600発が、1977年か87年にかけてC-33、C-34爆発体に付着した異物として、あるいは、原子炉容器使用済燃料ベケットなどから回収されたものと説明されている。また、その他の約300発が、黒銅製、鋼フィルダー、あるいは鉛銅系被覆面などに付着して存在するものと推定されているが、いぜんとして、残りの300発は行方不明となっている。

な形状を維持して、核分裂エネルギーの外部への有効な伝達を可能にすることであり、もう一つは、核分裂に伴って生じる核分裂生成物（いわゆる「死の灰」）を閉じこめることである。この二つの役割は、原子炉の運転上最も基本的かつ重要なものであるが、燃料棒が破損すれば核分裂生成物の閉じこめはただちにできなくなるし、破損が大きくなれば炉心内の冷却形状を破壊して大事故をひきおこすことになる。したがって、燃料棒の健全性を維持することは原子力発電の安全性という点で最重要の課題である。そのため、燃料棒が破損すれば、たとえ破損がごく小さなピンホールと推定される場合でも、その燃料棒を含む燃料束全体を新品と交換したり、原因究明や対策確立のために多くの努力が続けられたりしてきたのである。しかるに、美浜1号炉で発見された燃料棒の折損は過去に何をみないほど大規模かつ深刻なものであった。

折損した燃料集合体の概略を図2に、また発見後回収された折損部の被覆管やペレットの量を表1に示す。こ

れからも明らかのように、実証1号炉燃料棒損傷事故では燃料棒2本が合計170 cmにもわたって折損し、一部の被覆管やペレットは粉々になって炉内を循環し、いまだに行方不明である。回収された被覆管は7片であり、図3¹⁰⁾にその外観スケッチの一部を示す。回収された被覆管は、軸方向にヤスリで削りとられたかのようなフラット面を覆っているほか、一部では破断、めくれ、ふくれ、ふくれによる開口などを示し、さらには原研不明の白色の結状物質が付着しているように見

その上さらに重要なことは、回収された被覆管内に残存していた UO_2 ペレットの一部のものが、極めて異常であったことである。図4、5^(a)に示すように、回収されたペレットの一部のものは、その中心部に“白色異相”と呼ばれる特異な相を示していた。この“白色異相”については後に詳しく触れるが、この相には通常のペレットの組成である UO_2 のほかに U_2O_5 が含まれていることが明らかになっている。

事故原因についての国庫の査察

国(科学技術庁、通産産業省)は、美浜1号炉で折損事故があったことを1976年12月4日になって初めて認め、その翌年8月に調査結果とそれについての公式見解を発表した¹⁾。その中で国はこの事故の原因を、“原子炉の運転中に炉心バッフル板接合部からの横流れの水流により燃料棒が振動し、バッフル板または他の部材等に打ち当たったため損傷に至ったものと判断される”と主張している。

折曲した燃料棒、燃料集合体の原子炉内での位置を示

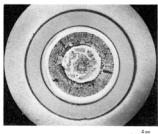


図4 白色異相部(燃料棒横断面)。

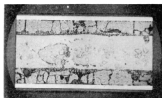


図5 白色異相部(燃料棒縦断面)。

すために、炉心の横断面図を図6に、その付近の水の流れを炉心の縦断面で図7⁹⁾に示す。バップル板とは、円筒形の炉心槽内に燃料集合体を配列するために炉心部に組み立てられている型枠である。美浜1号炉の場合、このバップル板は厚さ約3 cm、幅20~40 cm、長さ約4 mのステンレス板26枚をボルト締めで組み立て、その全体はバップル支持板により炉心槽に固定されている。また、入口ノズルから圧力容器内に流入した冷却水は、図7のように、大部分は圧力容器と炉心槽の側を下向きに流れ、底部で方向を反転して炉心内を上向きに流れ、そこで燃料棒からの発熱を除去する。しかし、この主流のほかに一部の水は炉心槽側面の穴から炉心槽とバップル板の間に流入し、その部分を下降してバップル板の底部で主流に合流する、いわゆる“バイパス流”になっている。しかし、実際にはバップル板は複数の平板がボルト締めで組み立てられており、接合部に微小な隙間が生じることが避けられない。この隙間を通過して冷却水が炉心内に吹き込む可能性がある。図6にあるように折損した燃料棒はちょうど“調整コーナー”と呼ばれるこのバップル板接合部に位置し、前述の図の主張は、このバップル板接合部から流入した横流れの冷却水によって燃料



図6 炉心の横断面図。③-④の部は“調整コーナー”と呼ばれる。

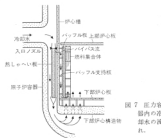


図7 圧力容器内の冷却水の流れ。

棒が振動し機械的に損傷を受けたとっているのである。そして、この機械的原理による損傷に対して図8はバップル板接合部の隙間を叩き潰してしまえば今後この種の事故はおこらないと主張するのである。

図はこうした判断の根拠に“実験および計算コードによる解析結果”をあげている¹⁰⁾。たしかに、燃料棒の振動実験は日本では三菱重工によって行なわれている。しかし、三菱重工が委託を受けて実験を行なったのは、国の公式見解が示された後の1977年10月から1978年5月にかけてであり、その報告書¹¹⁾が提出されたのは1978年7月である。したがって、図が判断の根拠にあげている“実験”とは国内で行なわれた三菱重工の実験ではない。実は国のいう“実験”とは美浜1号炉のメーカーであるアメリカのウェスチングハウス(WH)社がそれ以前にすでに実施していた実験のことなのである。世界最大のPWRメーカーであるWH社は美浜1号炉で燃料棒折損事故を経験する以前に、すでに1971年、1972年の2回にわたるスベインのソリタ炉で同種の事故を経験し¹²⁾、特に1972年の事故に当たってはこの種の事



図8 調整コーナーにおけるパッフル板間隙部の形状の仮定。



図9 ビーニング後のパッフル板調整コーナー間隙部の形状の仮定。

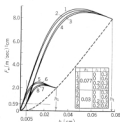


図10 ビーニング後のパッフル板間隙出口部の形状がビーニング後のモーメント・フラックスに及ぼす効果。

故が運転中に生ずることを明確に認識して、原因究明に乗り出したのである。燃料棒の振動実験やそれに付随する解析を行なう中で、結局 WH 社はパッフル板間隙からの横流れ水が燃料棒折損の原因であると判断するに至り、その対策として水中ハンマーでパッフル板間隙を叩き潰す“ビーニング”(peening)工事なるものを考案したのである。WH 社としては、ソリタが同型の原子炉では当然同様の事故が再発することを予想したであろうし、事実、翌 1973 年には美浜 1 号炉、1975 年にはアメリカポイントビーチ 1 号炉^{10,11)}、1976 年には日本の高浜 2 号炉で同様の事故が発見される¹²⁾のである。

美浜 1 号炉の所有者である関西電力は、燃料棒折損事故が 3 年 8 か月ものあいだ公にされなかったことについて、“事故を発見した 1973 年当時は、この事故が運転中におこったとは考えず、単に燃料取替作業中に続いたものと判断したため、報告も公表もしなかった”と弁明しているが、何のことはない、実際には事故発見直後に WH 社とともに、ビーニング工事で実施しているのである。

国の主張と対策に対する疑問

美浜 1 号炉燃料棒折損事故の原因が、国の主張するようにパッフル板接合部間隙からの横流れ水であるとしても、国の示した対策には多数の疑問が残っている。

折損事故が発生したのは、図 6 にも示したように、いわゆる“調整コーナー”と呼ばれる接合部に位置する燃料棒であった。この調整コーナーは、図 8 に示すような形に組み合わされていて、3 箇の接合面をもっている。三重蓋工が行なった実験ではこれら 3 箇の間隙をいく通りに変化させ、横流れ水出口の間隙幅がいくらかになったときに燃料棒の振動が始まるかを求めている。そして、出口の間隙幅を H 、出口における横流れ水の流速を V とし、 VH で与えられる量(この量を“モーメント・フラックス”と呼ぶ)でそのときの水流の強さが測られるものとして、燃料棒の振動が始まるモーメント

・フラックスの限界値を評価している。WH 社が行なった実験も類似のものと思われるが、この実験データは企業機密を理由に提供が拒否されている。国は、この WH 社の実験を根拠にして燃料棒の振動が始まるモーメント・フラックスの限界値は $0.35(\text{cm/s})^2 \text{cm}$ であり、ビーニングによって間隙出口部を $0.05(\text{mm})$ 以下に狭めることができれば、いかなるパッフル板接合部においても横流れ水の強さがこのモーメント・フラックスの限界値を越えることはないとして主張している。そして現在、この $0.05(\text{mm})$ という値がビーニングの基準値にされている。

調整コーナーの 3 箇の接合面のうち実際にその間隙が測定しうるのはが心側の 1 箇、それも横流れ水の出口にあたる部分だけである。したがって、この接合面の間隙が 3 箇を通して実際にどこで狭がりどこで狭まっているのかはわからず、仮りに心側の 1 箇で間隙が狭まってもその他の面では間隙が大きい場合もあるし、またその逆の場合も考えられる。ここではまず単純に図 8 に示すように仮が一様な間隙を考え、次にそれが出口を水中ハンマーで叩き潰すことによって図 9 のように変形したと仮定し、モーメント・フラックスがいくらかの変化をするかを評価すると図 10¹³⁾になる。図 10 の点線は間隙の全体が出口と同じ幅であるときのモーメント・フラックスを示しているが、図 10 で明らかなように、水流の強さは出口の間隙をほど細密に狭められないかぎり、出口だけを狭めてもあまり小さくならず、狭め方が不足すれば、水流の強さはかえって増加してしまうことがわかる。このことは、ホースの先から水を流しておき、ホースの先を指でつまんだりすれば、水の勢いがより大きくなることと似ている。図 10 の左下に一点鎖線で示した直線は、水平な方は先に述べたモーメント・フラッ

タスの限界値(0.59(m/s)² cm)を、垂直な方はビーニング基準値(0.05 mm)を示している。この基準値自体の妥当性はデータが非公開のため判断できないが、仮りにこの基準値が妥当であったとしても、図10のライン1, 2, 5, 6が示すように、ビーニングによって間隙が狭められた部分の長さ(l_0)が短いと、0.05 mmというビーニング基準値が満たされても、予想される水流の強さは燃料棒の振動が始まる限界値を越えてしまう。実証1号炉の場合には、ライン3, 4, 7, 8が示すように、 l_0 が2 mm以上になった場合にはじめて0.05 mmまでのビーニングによって水流の強さを限界値以下にできるようにみえる。しかし、大飯原発などの大型炉ではパッフル板内外の圧力差はより大きく、そのため横流れ水の強さもそれに比例して大きくなっており、0.05 mmというビーニング基準値では水流の強さを限界値以下に抑えこめない可能性がある。

その上、ビーニングという工事は、炉心からの強い放射線を避けるために水面下十数メートルのパッフル板に対して遠隔操作で行なわなければならない。0.05 mmという精度を出すことは困難であるし(本誌1頁の厚さは約0.08 mm)、それを測定することすら難しい。さらに、この対策によってより重大なことは、仮りにビーニング工事でこの間隙が狭められたとしても、その間隙が原子炉の運転中に再び拡大する可能性があることである。三菱重工が行なった燃料棒の振動実験によれば、ひとたび振動領域に入った燃料棒では急速に広損が進行しており、仮りにビーニングで基準以下に間隙を狭めたとしても、その間隙が次の定期検査までの運転中に十分な大きさにまで拡大してしまえば、やはり燃料棒の破損はまぬがれないのである。したがって、パッフル板間隙が運転中にどのような変化をするのかは極めて重要であるが、この点についてのデータ提供は拒否されている。しかし、実証1号炉では折損事故直後(1973年5月)にビーニングが実施されたにもかかわらず、1977年12月には再びビーニングが行なわれており、パッフル板間隙が運転中に拡大することを示唆している。この傾向はほかの原発でも同様で、1976年から1977年にかけてすべてのPWRでパッフル板間隙の測定やビーニングによる調整が行なわれたにもかかわらず、1978年から1979年にかけて行なわれた定期検査では高浜1, 2号炉、実証3号炉、玄海1号炉などの各炉で軒並みに再度のビーニングが実施されている¹⁴⁾。

実証1号炉燃料棒折損事故の原因が、仮りに国の主張のように、パッフル板間隙からの横流れ水による振動という機械的要因だけだとしても、その対策といわれるビーニングには有効性の点で多くの疑問が残っている。燃

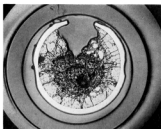


図11 ふくれ開口。

料棒の振動が始まる水流の強さの限界値や、ビーニング基準値は、実験データが公開されないために、その妥当性を確認できない。仮りに実証1号炉の調整コーナーではそれが妥当であるとしても、大型炉などではなお危険が残っている可能性がある。さらに、基準値を満たすような精度でビーニングを実施するには実証上の困難があるし、それを測定することすら難しい。その上、一度ビーニングで間隙を狭めてもその間隙が運転中に再び拡大してくる可能性が高いから、この対策は燃料棒折損事故を防止するための根本的対策にはなっていない。

機械的要因以外の原因の存在

実証1号炉の燃料棒折損事故に関しては国の主張のような機械的要因だけでは説明しきれない現象もいくつか見出されている。すなわち、(a)折損した燃料棒を含む燃料集合体全体に斜めに入っている被覆管の黒色変色、(b)折損燃料棒被覆管片表面白色付着物、(c)折損部ベレット中心部にみられる白色異相、(d)折損部ベレットの膨張・密度低下、(e)20 cmにも及ぶ被覆管の鉛矢、などであり、これらの現象は熱的な作用があったことを示唆している。

これらについては国は全く見解を示していないが、このうち特に(c)、(d)で示したものは熱的作用なくしては説明できない。折損燃料棒の中には表1にも示したように、約200 gのベレットが折っていたが、その一部の顕微鏡写真を図11¹⁵⁾に示す。原研での調査によれば回収されたベレットはみかけの密度が7.1~9.4になり、燃料棒製作時の密度(9.97)に比べていちじるしく密度が低下して、これらのベレットが膨張したことを示している。特にベレット中央部での膨張はいちじるしく、外周部には多数の割れが生じているし、被覆管はこのベレットの膨張によって開口するに至っている。原研の調査報告書

図 12 UO_2 基部に侵入した白色異相。

表 2 ウラン酸化物の密度。

化合物	結晶系	密度 (g/cm^3)
UO_2	面心立方	10.97
UO_3	単斜	8.74
$\alpha-U_2O_5$	斜方	8.43
$\beta-U_2O_5$	斜方(高温相)	8.38
$\gamma-U_2O_5$	斜方	8.32

は、この点を“これは、冷却材の侵入により燃料ペレットが体積膨張を生じ、軸方向の臍内部を押しひろげたためと思われる”¹⁹⁾と述べている。この指摘は正しい、しかし問題なのは、“なぜ冷却水の侵入によって燃料ペレットが体積膨張したか”ということである。本来 UO_2 は安定な化合物で、通常の条件では水と反応することはありえないといわれ、それゆえにこそ原子力発電における燃料ペレットの材料に選ばれたのである。表2にウラン酸化物の密度を示すが、 UO_2 ペレットは溶解あるいは酸化によって体積膨張を生ずる。したがって、折損 UO_2 ペレットの膨張は UO_3 が溶解あるいは酸化した可能性を示唆している。

“白色異相”についてはすでに触れたが、原研の調査によって、この相には UO_3 のほかに U_2O_5 が検出されており、少なくとも UO_3 ペレットがなんらかの原因によって酸化されたことは明らかである。燃料ペレットが反応しうる酸は冷却水以外から供給されることは考えられないから、この U_2O_5 は UO_3 燃料ペレットが冷却水と反応して生成したことは疑問の余地がない。しかし、折損した燃料棒は炉心の最外周に位置するために比較的温度は低く、図6が示したデータによれば、通常の条件にあるかぎりペレット中心部でも最高温度は $420^\circ C$ である。しかし、こうした低い温度の条件では UO_3 の酸化はおこらず、燃料ペレットが酸化していたということは、この部分が異常に高温になっていたことを示している。この点について図はただ“溶解の形跡はない”と述べるだけで、“白色異相”生成の原因は不明とされたままである。

しかし、この“白色異相”は図12に示すように、外周

図 13 γ -オートラジオグラフィ。図5の燃料棒に写真のフィルムを密着させて作成。白い部分は放射線強度が高い。

の UO_2 クラックに沿って侵入した形で生じている。さらに図13に γ -オートラジオグラフィを示すように、この“白色異相”部は周辺 UO_2 部に比べて放射線強度が弱く、核分裂生成物が逃げてしまっていることを示している。これらのことはこの“白色異相”が生成時には液相であったことを強く示唆する。

PWRの一次冷却水中には溶解酸素を抑制するために水素が添加されているが、熱力学的に評価してみると通常の運転条件の下で UO_3 が酸化するためには $1,100^\circ C$ 以上の温度が必要である²⁰⁾。また $U-O$ 系の状態図は特に高酸素分圧・高温状態で未知の領域があるが、仮りに $[UO_{3.1} + U_{2}O_{5} + \text{液体}]$ の三重点が共晶点であれば、 UO_3 の酸化相で液相が生ずる温度は $1,600^\circ C$ 以上であると推定されている²¹⁾。

美浜1号が燃料棒折損事故ではペレットの温度が通常予測されてきた温度よりはるかに高かったことは明らかであるし、場合によっては $1,600^\circ C$ を越えていたことも考えられる。燃料棒内の温度は通常運転時の燃料棒の健全性にとっても重要であるし、また蓄積熱との関係で事故時の燃料棒の健全性にとっても重要である。したがって燃料棒折損事故における熱的な要因を究明することは極めて重要なはずであるが、今日になってもいまだに国はこの熱的要因は無視する態度を続けている。

燃料ペレットの温度を上昇させる一つの可能性としては、燃料棒表面でのDNB(departure from nucleate boiling)の発生が考えられる。折損した燃料棒は炉心の最外周に位置し、核分裂の割合が低く発熱が小さいために、通常の形状が保たれているかぎり、熱的には素な状態にあるといえる。しかし一方で、この燃料棒はバップル板に面しており、燃料棒が変形してバップル板に接触した場合などには冷却材の流動面積が小さくなる上、摩

熱抵抗によって流量がいかに減少する可能性がある。そうした場合には結露冷却水不足から特に燃料棒上部では、蒸気の割合が高くなって熱除去が困難になると考えられる⁽¹⁰⁾。本来、DNBの発生する条件は、発熱量、熱交換可能な面積、冷却材の流量・性質など多数の因子によって影響されるため、個々の場合について実験的に求められてきた。しかし、炉心最外周の燃料棒がバッフル板と接触した場合についてはいまだにそうした想定も実験もなされておらず、DNB発生の条件も決められていない。折損した燃料棒は実際には漁りをおこなっているし、燃料棒を正常な位置に保つためのグリッドスプリングも欠損している。バッフル板は、中性子やγ線の照射を受けてそれ自身発熱体となっているし、正常な位置を維持しえずにバッフル板と接触した燃料棒がDNBをおこすという可能性は十分にあるといえ、この点の実験による確認もなされるべきである。

燃料破損の検知

すでに述べたように、原子力発電所の安全性にとって燃料棒の健全性は重要であり、仮りに破損が生じた場合には速やかにそれを検知して適切な処置をとるべきである。そのため米国1号炉の「安全審査報告書」⁽¹¹⁾においても「一次冷却水中の放射性物質濃度を監視することにより燃料被覆の破損を発見し、定常運転時の破損率を低くおさえることにしている」と記載されているのである。しかし、米国1号炉の燃料棒折損事故は、実際にはそれが発生したときには検知されず、定期検査のため原子炉を停止して、燃料集合体を炉心からとり出したときに初めて発見されたのであった。国や関西電力はこの点について、「当時、一次冷却水中の放射能濃度には特に大きなピークが生じなかったので検知できなかった。折損燃料棒は急速に大破損したのではなく、破損はピンホールから徐々に進行したものと思われる」と主張している。しかし、未曾有の大破損であった米国1号炉の燃料棒折損事故から検知できなかったとすれば、「安全審査報告書」の認定は単なる机上の空論になってしまう。ところが、実際には一次冷却水中のヨウ素(I-131)濃度には異常がみられており、国や関西電力がその異常の評価と検知に失敗しているのである。I-131はウランが燃焼して生成される核分裂生成物の一種であるが、ペレットから逃げやすい上、被覆管の欠陥部分を容易に通過するため、原子炉では燃料棒被覆管の破損検知に古くから利用されてきた。

普通一次冷却水中の放射性物質濃度の評価では図14のようなモデルを考え、放射性物質の移動を2段階に考慮する。すなわち、第一段階では燃料棒内から被覆管の



図14 核分裂生成物の燃料棒から一次系への移行モデル。

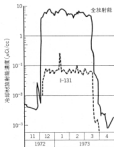


図15 米国1号炉における一次冷却水の放射能濃度の変化。

ピンホールを通して $\alpha(\text{sec}^{-1})$ なる割合で一次冷却水中へ移行し、次に一次冷却水中からは浄化系などによって $\alpha(\text{sec}^{-1})$ なる割合で除去されると考えるのである。このモデルによると、平衡状態で一次冷却水中の放射性物質濃度は、次式で表わされる。

$$C^{\infty}(p) = \frac{\alpha A^{\infty}(p)}{W(\lambda + \alpha)}$$

ここで、 p : 被覆管に欠陥をもつ燃料棒の出力 (MW)、 $A^{\infty}(p)$: p なる出力をもつ燃料棒中に平衡状態時に蓄積する特定の放射性物質の量 (Ci)、 $C^{\infty}(p)$: p なる出力をもつ燃料棒被覆管に欠陥があり、平衡状態になった場合の特定の核種の一次冷却水中放射能濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{ml}$)、 W : 一次冷却水量 (m^3)、 λ : 特定の核種の物理的半減期 (sec^{-1})、 α : 前述の量、である。

したがって、一次冷却水中の放射性物質の濃度を測定することによって被覆管に欠陥のある燃料棒の出力を推定することもできるのである。

折損事故が発見された1973年4月直前の米国1号炉



図 16 核分裂生成物の改良移行モデル。

一次冷却水中の I-131 濃度を図 15 に示す。国の公式見解の基礎になったと思われる資料¹⁰⁾によれば、当時美浜 1 号炉で大規模な燃料棒の破損がおこれば“I-131 濃度は同時に $0.8 \mu\text{Ci}/\text{ml}$ まで上昇し、その後 $0.3 \mu\text{Ci}/\text{ml}$ で落ちつく”ということにされていて、図 15 にはそうした変化がみられないため、結局“燃料棒折損事故は、小さい破損から徐々に拡大したものと考えられ、そのため検知できなかった”ということになってしまふ、しかし、この国の解釈では、(1)破損を仮定する燃料棒が実際に折損した炉心最外周の低出力(約 $1.3 \text{ kW}/\text{ft}$)の燃料棒ではなく、炉心平均出力 ($4.64 \text{ kW}/\text{ft}$)の燃料棒であったり、(2)当時美浜 1 号炉が蒸気発生器細管の大量の破損により設計出力 (340 MWe) の約 7 割 (230 MWe) の出力で運転されていたという事実を無視し、100% 出力運転という条件下で評価しているし、(3)最も重要な誤りは、大破損後はペレット内で生成した I-131 の全量がそのまま一次冷却水中に放出される、という現実には全くありえない仮定の下に評価されていたのである。

図 14 に示したモデルをそのまま用いたのでは大破損時の挙動を評価できないので、図 14 のモデルをもう 1 段こまかくして図 16 のような 3 段階のモデルを考える。すなわち、ペレットから被覆管内の空隙部(ギャップおよびブレナム)に逃げ出す割合を $\beta(\text{sec}^{-1})$ とし、その空隙部から一次冷却水中に逃げ出す割合を $\gamma(\text{sec}^{-1})$ とした上で、被覆管が大破損した場合には $\gamma \gg 1$ と仮定するのである。こうしたモデルの下に既述の各種のデータから β, γ の値を推定し、実際に折損していた燃料棒の出力なども考慮した上で、2 本の燃料棒が同時に急速に破損をおこした場合の一次冷却水中の I-131 濃度の変化を評価すると図 17¹⁰⁾となる。図 17 と、図 15 に示した 1973 年 1 月 10 日頃に生じている I-131 濃度のピークを比べてみれば明らかのように、実際に測定されたピークは、図 17 に示した予想上の変化とよく一致しており、燃料棒折損事故がこの時点で発生した可能性を強く示している。

こうした評価に対して、国や関西電力は“急速破損がおこると冷却水の全放射能レベルは $6 \mu\text{Ci}/\text{ml}$ 程度(希ガ

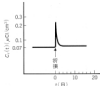


図 17 C-34 集合体、D-13 = ッ F、D-14 = ッ F が大破損した場合の一次冷却水の I-131 濃度変化の予測。

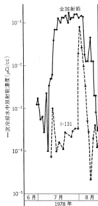


図 18 大破 1 号炉における一次冷却水の放射能濃度の変化。

スを除くと約 $2 \mu\text{Ci}/\text{ml}$ のピークを示し徐々に 1 カ月ぐらいいかけて $5 \mu\text{Ci}/\text{cc}$ に落ちついていくはずであり、実際にはそうしたピークは観測されていないので、急速破損があったとは考えられない。1 月 10 日頃にみられる I-131 のピークは測定誤差である”旨の主張をしている。ところが、美浜 1 号炉において“全放射能濃度”の測定は、一次冷却水をサンプリングした後、高純度固して測定用試料を作り、それを GM 計数管によって測定するという手順で行われており¹⁰⁾、そうした測定法では燃料破損時に一次冷却水中へ最も放出されやすい希ガスやヨウ素など揮発性の核種はすべて測定試料から逃げてしまっていて、たとえ燃料が破損しても測定された“全放射能濃度”の値に大きな変化が生じないことなど当然なのである。仮りに国が主張するように、希ガスを除いた

表 3 日本の原子力発電所における燃料棒破損事故

原子炉 の型	事故を起こ した原子力 発電所	発生年月	事 故 の 概 要
PWR	美浜1号	1973. 4	燃料棒2本が合計179cmにわたり割損(本論文で取り上げている事故)
		1974. 2	燃料棒破損
		1979	燃料棒集合体1部に腐蝕、2部に漏洩の疑い、全部4本交換
		1980. 10	燃料棒集合体1部にピンホール、2本取り替え
	美浜2号	1973. 12	燃料棒集合体15部に腐り現象、6部にピンホール
		1975. 5	燃料棒集合体8部に腐り現象
		1977. 3	燃料棒集合体3部にピンホール
		1979. 4	4本子機集合体の一部が外れて炉心上で発見される
	大飯1号	1979. 6	燃料棒集合体2部のグッド破損、別の1体のグッドと燃料棒間に“異物”発見
		1979. 3	燃料棒集合体7部に腐り現象
		1977. 2	グッドの一部が3cmにわたって欠損
		1977. 3	燃料棒集合体3部にピンホール
	大飯2号	1979. 1	燃料棒製作途中所定の位置に設置されず、燃料棒集合体を倒す
		1979. 11	燃料棒集合体1部に破損(美浜1号炉で起こった破損と同一の現象)
		1979. 10	燃料棒芯ミズで燃料棒集合体が腐る
		1979. 6	燃料棒集合体1部にピンホール
	伊豆1号	1980. 4	燃料棒集合体1部にピンホール
		1977. 10	グッドの腐蝕、燃料棒の曲がり、燃料棒集合体の6個破損
		1978. 8	90%出力の試験中に異常な放射線漏れ、燃料棒集合体3部にピンホール、1部にグッド欠損と発見される(本論文で取り上げている事故)
	大飯3号	1980. 1	燃料棒集合体1部から放射線漏れ
		1980. 5	燃料棒集合体コイルスプリング破損
		1978. 8	燃料棒集合体150本のうち15部に変形
		1979. 4	予備燃料棒集合体2部に腐蝕、再検査のため返送
BWR	大飯3号	1980. 10	燃料棒集合体、コイルスプリング132本中9本に欠損
		1978. 4	燃料棒集合体に放射線漏れ
	飯沼1号	1971. 5	燃料棒集合体14部にピンホール
		1972. 9	燃料棒集合体4部にピンホール
		1972. 10	燃料棒集合体引抜き作業中に、集合体1本を誤って落下させ損傷
		1973. 6	燃料棒集合体13部にピンホール
	福島第1号	1974. 5	燃料棒集合体26部にピンホール
		1977. 6	燃料棒集合体3部にピンホール
		1971. 9	燃料棒集合体8部にピンホール
		1972. 9	燃料棒集合体19部にピンホール
	福島第1号	1973. 4	燃料棒集合体38部にピンホール、損傷多し
		1978. 12	燃料棒集合体22本から漏洩、そのうち6本にはびけ割れ
		1979. 9	東海再処理工事に運び込まれた使用済燃料棒集合体1本にびけ割れ、他の1本にグッド欠損が発見される

2 $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ がすべて測定されたとしても、図 15 で明らかのように当時 5~8 $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ あった全放射能濃度の変化の中に埋もれてしまうことは、測定誤差の点で極めてありうることである。一方、燃料棒損の検知に効いている I-131 の濃度は当時の定常的な値で 0.07 $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ 、ピークでは 0.3 $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ もあり、これらの値を国の主張のように測定誤差に帰することは非常に無理がある。

表 3 にも示すように、美浜 1 号炉のこの燃料棒損事故の後にも原子力発電所での燃料棒破損は続発している、このうち 1978 年 8 月、試運転中の大飯 1 号炉で起こった燃料棒破損事故について当時の一次冷却水中放射能濃度の変化を図 18 に示す。この事故後、関西電力は大飯 1 号炉の運転を停止し、検査の結果 3 本の燃料棒集合体に

“ピンホール”が発見され、1 体にグッド欠損が発見されたと発表した。しかし、図 18 にみられる I-131 濃度のピークはそれ以前のレベルの約 300 倍にも達しており、これは低出力燃料棒にかなり大きな破損を生じたか、あるいは少なくとも約 20 本の燃料棒に同時に“ピンホール”が開いたことに相当している。多数の燃料棒に同時にピンホールが開くことは工学的には考えにくい、もし仮りにそうした場合がおこったのであればその原因究明は重要である。また、単一の低出力燃料棒に大破損が生じたことれば、美浜 1 号炉燃料棒損事故との関連も明らかにされねばならない、いずれにしても、この事故については詳細な調査が必要と思われるが、事態を明らかにするデータは一切公表されていない、少なくとも、

燃料棒破損をすべて“ピンホール”という便利な言葉で片付けてしまうことは、今後の燃料棒事故に対処する上で有害無益であることを指摘しておきたい。

国の審査・監督体制の欠陥

美浜1号炉で発生した燃料棒折損事故については、国は1976年12月まで一切報告も受けず、知らなかったということにされている。しかし、事故が発見された第2回定期検査も、当然国の検査官によって行なわれたのであるし、たまたま検査官が発見時に現場にいなかったとしても、その後炉内に散乱した燃料棒片の回収作業や、WH社の技術者が大型の工具を搬入して行なったピーニング工事がなされているのであるから、これらすべてを国の検査官が知らずに済ませられることなどありえない。仮りにそれらすべてを知らなかったというのであれば、国の行なう定期検査なるものが全く無意味なものといわなければならない。

その上、この折損事故後関西電力が行なった燃料棒配置変更では、折損事故を公にしないためと思われる極めて異常な配置が行なわれており、その異常な配置変更申請も国の安全審査を何のクレームもなく通過している⁽¹⁾。一流の権威者であるはずの安全審査委員がこの異常さを見抜けなかったとすれば問題であるし、見抜いた上で事故の隠蔽に協力したのだとすればさらに重大である。また、国は先に述べた公式見解を美浜1号でアメリカの原子力規制委員会に送っているが、その中で意図的と思われる“誤訳”までしている。核燃料物質の管理は枝社散という観点から国際的な問題でもあり、大量の核燃料物質が行方不明になった事故を4年近くも放置していたことは国際的な背信行為でもある。国がこの事故の調査を公式に開始したのは1976年12月であり、先の公式見解にもその旨が記されている。しかし、その記述は美浜1号と記され、事故発見後比較的早くから調査が実施されたかのようにされているのである。国は、この点について、“単純なミスである”旨の弁明をしている⁽²⁾が、政府間の公式文書という観点からみても、また常識的な観点からみても、上記の“誤訳”は“単純なミス”によってはとうていおこりえない“誤訳”のように思われる。

美浜1号が燃料棒折損事故をめぐって明らかにになった国の規制体制はいちじるしい欠陥を含んでいるといわざ

るをえないし、さらに残念なことはこの点については何の改善もなされていないことである。

原子力発電所における燃料棒の健全性は極めて重要であるが、表8にも示したように燃料棒に関する事故は続出しており、本論文執筆中にも美浜1号、大飯2号などで燃料棒関係の事故が発見されたと報道されている⁽³⁾。

なんらかの事故がおこった場合には、その事故を十分に調査し、原因を究明し、そして妥当な対策をとるべきであることは当然である。しかし、美浜1号炉の燃料棒折損事故については事故発見後8年も経過した今日でも原因究明は不十分であるし、対策もまた妥当なものとなっていない。その上、他の事故の場合も含めて国と電力会社が企業機密を理由にデータの公開を拒んだり事故そのものの隠蔽を行なうといった状態が続いており、原子力発電所の安全性の向上は大きな壁に突き当たっている。

本論文は京都大学原子炉実験所原子力安全研究グループの諸氏からの数多くの貴重な助言を得て書かれたことを付記する。

文 献

- (1) 同前掲一冊：原子力安全、政策要綱（1976）
- (2) 中野哲二・小田原正：公害研究、8、No. 4（1979）；9、No. 1（1980）
- (3) 小田原正：朝日新聞大阪版、1979年1月18日付夕刊、1979年2月16日付朝刊“協賛”
- (4) 柴田俊一ほか編：京都大学原子炉実験所 KURORI-TR-107（1980）
- (5) 日本原子力研究所：美浜1号燃料棒片に関する調査中間報告書、1月（1977）
- (6) 日本原子力研究所：美浜1号燃料棒片に関する調査報告書、3月（1977）
- (7) 科学技術庁・通産省：原子力委員会年報、22、No. 8、p. 88（1977）
- (8) 著者不明：関西電力（株）美浜発電所第一炉の燃料棒の損傷原因について、参考資料、6月（1977）
- (9) 三原重三（現）：バットル・ワーク・ジェット流による燃料棒損傷の企業試験結果報告書、7月（1978）
- (10) R. E. Scamman et al.: Operational Experience with Westinghouse Core (up to December 31 1975): WCAP-803 Rev. 4, Mar.（1976）
- (11) Nucl. Saf., 11, 307（1976）
- (12) “DOCKST-60368”, Jan. 27（1976）, Feb. 25（1976）
- (13) 小田原正：ジェットフローの解着方法、(4)の場合第4章（1980）
- (14) 原子力安全委員会年報、通巻第19号、4月（1980）
- (15) 中野哲二：燃料棒破損の経緯変化について、(4)の報告書第5章（1980）
- (16) 小田原正：“DNB発生の可能性”、(4)の報告書第7章（1980）
- (17) 原子力安全専門委員会報告：関西電力（株）美浜発電所原子炉の損傷に係る安全性について、11月16日（1976）
- (18) 小田原正：燃料棒破損の技術（燃料型モニター）、(4)の報告書第8章（1980）
- (19) 朝日新聞 1979年3月30日付朝刊
- (20) 1980年10月17日付、朝日、毎日など各新聞