

まるで 原発などない かの ように

地震列島、原発の真実

原発老朽化問題研究会[編]

甲 第 2 号証

演会やシンポジウムで頻繁にこの図を使うようになっていいる。よほどこの図を気に入っているのだらう。

それはともかく、黒田委員の質問に小山田氏はつぎのように正直に答えたものだ——「この図、私も確かに何かのときに見たことはあるのですが、そういう図を作るときに、人間の頭の中でどういふふうに物を組み立てていくかというのが、人それぞれなものですから。どうも、必ずしもぴつたり、班目先生が書かれたものが、私にはよく分かっていないところもあります。」

原子力推進の盟友、班目春樹氏に対する気遣いから、意味のない多くの言葉が宙を舞っているが、要するに、小山田氏には班目氏が何を言っているかわからないということである。学者・班目氏が浜岡原発裁判で証人として主張した「三つの安全余裕論」。その安全神話は、不幸にも地方裁判所の裁判官たちを傾かせはしたものの、プロフェッショナル・エンジニアで切れ者の元原発設計技師の首を縦に振らせるだけの力をもたない、ということである。

【補足】この章では「安全率」が安全余裕の大きさを意味しないことを繰り返して説明したが、それは著者の勝手な論理ではないのかと疑いの読者もいるかもしれない。そこで、機械工学系の大学生の入門書、菊地正紀・和田義孝共著『よくわかる材料力学の基本』（秀和システム）につきぎのような説明があることを紹介しておきたい——「安全率が大きいということは応力予測の不確実性が大きいということを意味するのであり、安全性が高いことを意味するのではないことを正しく理解しましょう。」

*「設備健全性、耐震安全性に関する小委員会」第3回議事録より

第二章

材料は劣化する

争の温床

井野 博満

1 ■材料劣化で原発事故が起こった■

金属材料は必ず劣化する。身近でよく出会うのは疲労と腐食（さび）だろう。一般に金属材料が関係した事故原因は統計的にこの二つが圧倒的に多い。ニュースなどでも、金属疲労による航空機の事故や鉄筋の腐食による橋の崩落などを耳にする。

原発も例外ではない。疲労と腐食が主な事故原因になっている。それ以外に原発の場合は、最も恐れられていて避けることができない材料劣化原因がある。それは材料の照射脆化である。炉心からとび出してくる中性子が容器の鋼材に当たって、鋼材が脆くなる。最も注意しなければならない材料劣化である。これについては3節で詳しく述べる。材料劣化が原因で起こった事故を原因別に表2・1に示す。

美浜3号工口・工口事故

二〇〇四年八月九日

福井県美浜町の関西電

力美浜原子力発電所3

号機で配管が破裂、高

温高圧水蒸気の直撃を

受けた作業員4人が即

死、7人が全員やけど

の重軽傷を負い、うち

一人が2週間後に死亡

するとい痛ましい事

故が起こった。破裂し

た炭素鋼配管は、直径

56センチ、厚さ1セン

チもある大きなものだ

が、破裂した箇所では

厚さ1ミリ以下に薄くなっていたのだ。

エロージョン・コロージョン（略してエロ・コロ）で配管が削られ、90気圧もの内圧に耐えられず破裂したのである。そのメカニズムを図2・1に示した。破裂箇所の手前にはオリフィスがあつて流れが狭められていた。オリフィスというのは流れを狭めて圧力の差を測り、流速を調べる装置である。流れを狭められた水はその下流で乱れ、渦や気泡ができて配管を削り取る。それが侵食（エロージョン）である。表面が腐食（コロージョン）されるとそれが起こりやすい。このエロージョンとコロージョンが繰り返して起こって配管の減肉（管が薄くなる）が進む。

エロージョン・コロージョンが起こりそうな場所はほぼ決まっている。オリフィスで流れが狭められたり、配管がL字型に曲がったりしている箇所の下流側である。そういう箇所は減肉の様子を調べて管理することになっている。その管理指針にも問題があるのだが、

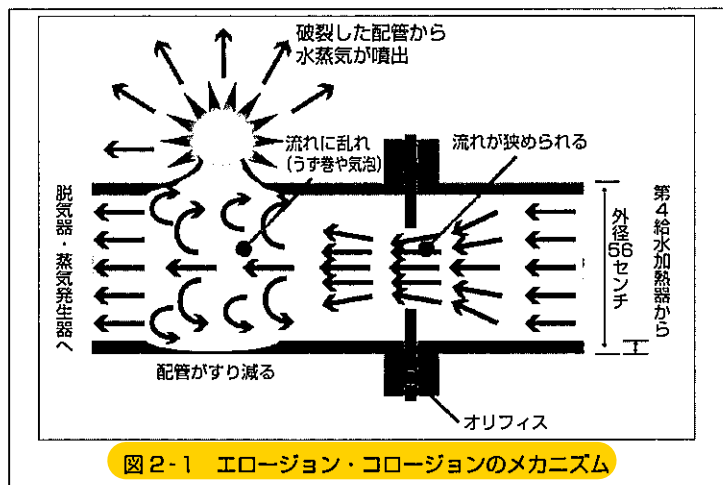


図2-1 エロージョン・コロージョンのメカニズム

表2-1 金属材料の劣化原因と原発事故例

劣化原因	現象・メカニズム	事故例
疲労 (降伏応力以下の小さい力が繰り返しかかり破損する)		
○機械的力によるもの	繰り返し外力や共振	○蒸気発生器細管の破断 (美浜2号、1991年2月) ○熱電対さや管の共振破断 (もんじゅ、1995年12月)
○熱的力によるもの (熱疲労)	熱膨張・収縮の繰り返し	○再生熱交換器のL字配管のひび割れ (敦賀2号、1999年7月)
腐食 (金属は酸化物に還元たがる。例外は金)		
○全面腐食	全面にさびが生じ減肉する。	
エロージョン・コロージョン	機械的侵食と化学的腐食が重なる	○2次系配管の破裂による死傷事故 (美浜3号、2004年8月)
○局部腐食	ひび割れが内部へ進展し、破断に至る	
ステンレス鋼の応力腐食割れ	炉水中の溶存酸素・溶接部の残存引張応力・材料の鋭敏化または加工組織の存在	○シュラウド・再循環系配管のひび割れ隠し (東電の全原発ほか、2002年8月～)
照射脆化 (炉中からの中性子照射によりもろくなる)		
○鋼材の照射脆化	脆性遷移温度の上昇	○圧力容器の高経年化
○ステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ	照射誘起偏析・硬化	○シュラウドの脆化

それはあとで述べる。この美浜3号機の事故はそれ以前の問題だった。

まず、**破裂箇所**の検査が行われていなかった。管理箇所のリストから漏れていて、運転開始（一九七六年）以来30年近く肉厚の検査がされていなかった。管理体制の不十分さと一口に言うが、**見落とし**の**事実**は**完璧に管理することの大変さ**をも示している。第二に関西電力とその下請け検査業者はこの**事実**に**事故直前には気付いていたが、次の定期検査のときに調べれば大丈夫だろうと放置した**。この検査引き延ばしは、経済性優先・安全軽視の犯罪行為と言える。その結果、次回の定期検査の直前、その準備のために作業員が多数現場に入っているという最悪の状況下で事故が起こった。

この事故をきっかけに、エロージョン・コロージョンによる減肉が各原発で進んでいて、いつ壊れてもおかしくないという事例が明るみに出た。例えば、福井県おおい町にある大飯1号機では4系統ある配管のうち3系統で主給水配管のエルボ部（L字型の彎曲部）で最小必要肉厚を下回る厚さまで減肉していることが見つかった。美浜や大飯のような加圧水型原子炉（PWR）だけでなく沸騰水型原子炉（BWR）でも大きな減肉が起こっていた。宮城県女川町にある女川1号機・2号機では炭素鋼より、エロ・コロに強いと言われている、ステンレス鋼製配管へ取り替えたにもかかわらず減肉が続いていた。コロージョンが少ないはずのステンレス鋼でなぜそうなのか、原因はよく分かっていない。

こうして予測より速いスピードで減肉が進む場所があることが分かってきた。その一因は予測方法Ⅱ配管肉厚の管理指針にある。管理指針によると、配管の部位と使用条件などから初期の減肉率を決め、それから最低限必要な肉厚に減肉するまでの時間（余寿命）を予測する。余寿命がつきる2年前までに配管肉厚を測定し、次の余寿命を決めることになっている。しかし、初期減肉率を決め間違つと余寿命が極端に長くなってしまつて、実際上検査が行われなくなる配管ができてしまふ。これは、定期的に検査しチェックしてゆく方法に比べ、危険なことだ。なぜこんな指針になっているのか、手間のかかる検査のコストを削減しようという発想以外のなものでもなからう。

疲労による原発事故

金属疲労による事故は輸送機関などの繰り返し荷重がかかる機器で起こっている。日航機御巣鷹山事故（一九八五年）では、かつて尻もち事故（一九七八年六月二日、伊丹空港）を起こした機体を修理して再使用したが、機内と機外の圧力差を調節する隔壁に繰り返し圧力がかかることによつて金属疲労を起こし破断、墜落した。その悪夢はいまだ記憶に新しい。

金属の疲労は、力が繰り返し構造物にかかることによつて起こる。例えば、針金を繰り返し逆方向に曲げると曲げた部分が硬くなり、やがて破断する。1回の力では塑性の変形を起こさない降伏応力（材料が元の形に戻らなくなるほどの力）以下の小さい力であっても、それが繰り返されると金属疲労を起こし、破断に至る。

金属疲労には、振動による力が加わつて起こる機械的疲労と機器に熱が加わつて起こる熱疲労とがある。

金属材料に熱が加わったとき材料自体が膨張しようとする力は非常に大きく、機器が拘束（固定）されているとその膨張を抑えようとする力（熱応力）が生まれ、その力は降伏応力を超えることもある。熱応力は構造設計で気をつけねばならない重要な因子である。

この熱疲労によって敦賀2号機（福井県）は、化学体積制御系再生熱交換器の連結配管から原子炉格納容器内に1次冷却水が漏れる事故を起こした（一九九九年七月）。加圧水型原子炉では原子炉の出力調整のために1次冷却水のなかにホウ酸（中性子吸収材）を添加している。そのホウ酸の濃度を管理するのが化学体積制御系である。この熱交換器では原子炉からの300度の熱湯と化学体積制御系で浄化された150度の水（これも熱湯ではあるが）との間で熱交換が行われるが、熱交換器の構造に問題があり、配管に温度の違う冷却材が交互に流れ込んで熱による膨張と収縮が繰り返され、熱疲労を起こしたことが判明した。この配管のひび割れの点検は全くなされていなかった（定期検査の項目に含まれていなかった）。

また、機械的な共振振動による疲労が原因の大きな事故は、美浜2号機の蒸気発生器で発生している（一九九一年二月）。蒸気発生器は加圧水型原子炉において、原子炉からの1次冷却水の熱を2次冷却水に移すための最重要機器であるが、しばしばトラブルを起こすので加圧水型原子炉のアクセス鍵とも言われている。蒸気発生器の内部にはU字型の細い管が多数（3000〜4000）集まった伝熱管があり、その薄い管壁（厚さ1.3〜1.5ミリ）を通じて熱が1次冷却水から2次冷却水へ引き渡される。この細い管とそれを支える板との隙間に腐食した金属のカスがたまり固着したため、

共振現象が起こり疲労によりギロチン破断を起こした。ギロチン破断とは、配管がすばっと真っ二つに割れるような破断をいう。振れ止め金具がきちんと挿入されていなかったこともあとで判明した（図2・2）。腐食と疲労、取り付けの不備が重なった事故である。状況によっては1次冷却水が失われ、炉心が空焚きになり一九七九

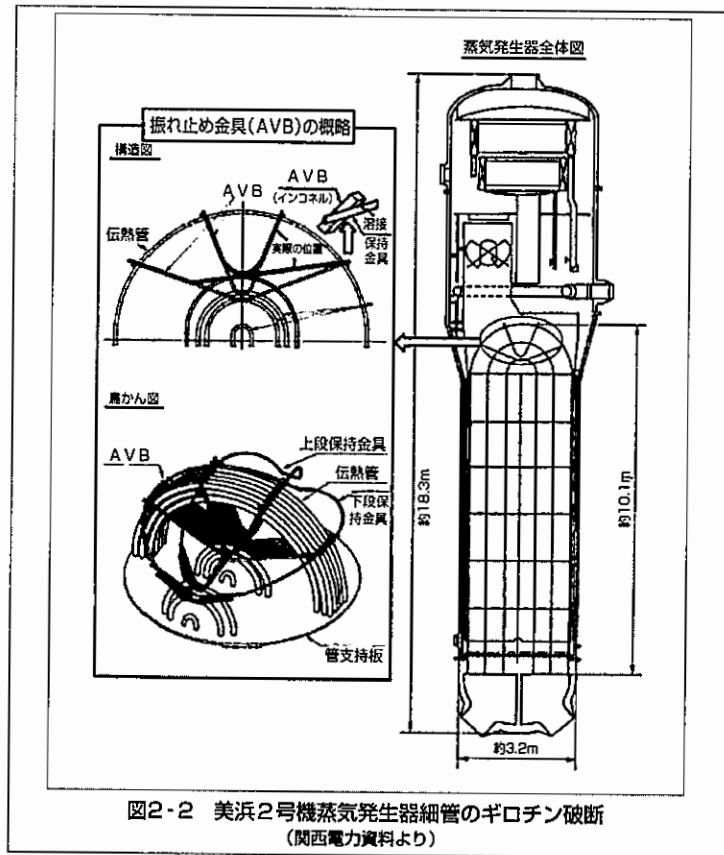


図2-2 美浜2号機蒸気発生器細管のギロチン破断
(関西電力資料より)

年にアメリカで起きたスリーマイル島原発事故と同じ炉心溶融事故を起こすところだった。現在、一九八二年までに建設・運転開始した11基の加圧水型原発のすべての蒸気発生器が使用不能になり、交換されている。蒸気発生器は、ほかの原発でも伝熱細管のつぶれや腐食カスの固着、応力腐食割れ(後述)などが多数発生しており、入口をふさいで使えない状態になった細管の割合が原発によっては10〜20パーセントに達している。そういう類発する損傷の上にこの大きな事故が発生したと言える。

高速増殖炉「もんじゅ」(福井県敦賀市)の熱電対破損事故(一九九五年十二月、冷却材ナトリウム)の温度を測る熱電対温度計を収めている「さや」が破損)もまた、共振による疲労が原因で起こった大きな事故である。熱電対のさや管がナトリウムの流れによって振動、金属疲労を起こして折れ、その穴から高温(約450度)のナトリウムが流れ出し、大気中の水分と化学反応して火災になった。ナトリウムは水と激しく反応するので、高速増殖炉の冷却材としてナトリウムを使うことの危険性は以前から指摘されていた。各国で高速増殖炉が実用化に至っていない原因の一つである。

この熱電対破損事故は、全く初歩的な設計ミスによるものだった。熱電対さや管は先端から15センチのところまで直径が10ミリから22ミリへ急に太くなる段付き構造になっていて、機械工学の知識があれば力がかかりやすいことに誰でも気づくおかしな設計であった。¹⁾しかも丸みを持たせるべき段付け部の曲率半径(曲がり具合を示す値)が後の検査では0.1ミリであり、削ったバイト(旋盤の刃の刃先の角度のままであったというから驚く。設計の問題点を下請けのメーカーが指摘したら、

設計どおりにやればいいのだ、という返事でそのままになったという。きちんとしたチェック機能が働かない事業者、動燃(動力炉・核燃料開発事業団。現在は日本原子力研究所と一体化して日本原子力研究所開発機構)の硬直した体制を示すものだ。

この熱電対はナトリウムの流れ(秒速5メートル程度で特別高速というわけではない)に垂直に置かれていた。熱電対さや管に流れがぶつかって、渦ができ、その渦がさや管を離れるときに反作用でさや管に力を及ぼす。流れのなかに円柱があるとき、流れは円柱にぶつかつた後、その両側に渦を発生させる。渦は柱の左右から交互に放出されカルマン渦と呼ばれる。このカルマン渦の放出頻度がさや管の固有振動数と一致すると共振を起こし大きな力が流れに対して垂直方向に加わる。タコマナローズ橋が風力による共振で崩落した事故(一九四〇年、米ワシントン州)で、カルマン渦はよく知られるようになった。この熱電対さや管の共振振動数は、このカルマン渦の周波数とは合っていないが、その倍の周波数を持つ双子渦(左右の渦が同時に放出される渦)の周波数と近く、共振を起こした。¹⁾設計者は双子渦のことも知らなかったようだ。

2 ■ ステンレスの応力腐食割れは防げない ■

二〇〇三年四月、東京電力の全原発17基の運転がすべて止まった。前年八月に発覚したひび割れ隠しが原因である。ひび割れが起こったのはシユラウド(原子炉内の燃料を取り囲むように設置されて

いる円筒状の支持構造物」と再循環系配管である。いずれも原発の最重要機器であるが、特に再循環系配管は、原子炉内に水を循環させる役目を持つ再循環系ポンプと原子炉を結ぶ配管で、炉心と同じ70気圧を保つための圧力バウンダリー(壁)を構成している。ひび割れで配管が破れることがあれば、炉内の冷却水が外部に噴出して失われ、炉心溶融や核暴走という大事故に直結する。

なぜ、ひび割れが起こったのか。なぜ、ひび割れを隠したのか。また、いかにしてひび割れ隠しが発覚したのか。

ステンレスのひび割れは30年前にも大問題だった

ステンレス (stainless) はさび (stain) の少ない (less) というその名の通り、錆びにくい材料である。鉄にクロムやニッケルというさび(腐食)を止める元素を添加してつくる。代表的なのは、クロム18パーセントとニッケル8パーセントを鉄に加えた18・8ステンレスと呼ばれる合金で、家庭用の流しや食器にもよく使われている。JIS規格でSUS304と名づけられている汎用ステンレス鋼である。初期の原発にもこの合金が使われた。ところが運転開始直後から次々とひび割れが発生し始めた。当時(一九七〇年代初め)、原発メーカー東芝の経営者の一人に「一体いつになったら原子力発電は信頼できるものになるのか、原子力がダメなら、ダメといってくれ」と言わしめたほどの大問題だった。

幸いにも、と言ってよいだろう。材料研究者の必死の努力によってひび割れの原因が突き止めら

れた。ステンレス鋼は表面に緻密なクロム酸化物の被膜ができることによつて腐食が内部へ進行することを防いでいる。ところが、溶接の際の熱の影響を受け、鋼中に微量に含まれている炭素が結晶粒界(結晶と結晶の間の境界)へ集まりクロムと結合してクロム炭化物を形成する。そのため粒界付近のクロム濃度が12パーセント程度まで低下し腐食しやすくなる。この現象をステンレス鋼の鋭敏化という。そこへ炉水中に溶けていた酸素がアタックし、溶接後の熱によるひずみによつて生じた力(残留引張応力)が粒界を引き裂き、表面から内部へ粒界に沿つて腐食割れが進行する。これが応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, 略してSCC) のメカニズムである。

こういうメカニズムが分かったのでステンレス鋼の強度を保つための炭素含有量を0・08パーセント程度から0・03パーセント以下に減らし、強さを補うため炭素の代わりに窒素を添加した。これがL材 (low carbon, 低炭素の意) と呼ばれるもので、SUS304L、SU



図2-3

柏崎刈羽1号機再循環系配管の溶接部近傍の表面加工層から生じた応力腐食割れ(400A、600Aは配管の直径(mm)を表す)
(東京電力資料より)

S316L、SU316NGなどがある。316はさらにモリブデンを添加して強化した合金、NGは nuclear grade (原子力標準) の略である。これで見事ひび割れは止まり、一九八〇年代から九〇年代にかけて、シユラウドや再循環系配管などの機器は次々とこの改良型ステンレスに交換された。

ひび割れ解決は実験室のなかだけだった

ところが、この新しい改良型ステンレス鋼L材が実際の原発に使われ始めて数年経った一九九〇年代になって、やはりひび割れが起こることが報告され始めた。その原因は、実際の原発で使用される際に材料が受ける表面加工や変形などであることが分かってきた。ひび割れが解決したのは実験室の制御された環境においてでしかなかった。

L材であってもグラインダーなどで表面が研磨されると加工による硬化が起こる。また、溶接箇所の近辺の熱を受けた部分 (熱影響部、Heat Affected Zone、略してHAZという) では熱応力によってひずみを受け、硬化する。そのような硬化領域ではひび割れ発生の頻度が大きくなり、ひび割れの進展速度も大きくなる。ひび割れを防ぐために材料に直接接触しなくても発熱させられる高周波加熱によって表面の応力を緩和したり、鋼球をぶつけて金属表面にわずかな凸凹をつくってひずみを起こしにくくするショットピーニングを行ったり、炉水中に水素を添加して水中に溶けている酸素を減らすなどの対策を行っているが、ひび割れを完全に抑えることはできていない。

検出が難しいひび割れ形状

L材に発生するひび割れはタチが悪い。改良前のステンレス材のひび割れは、溶接線に平行にまっすぐ割れてゆくものが多く、超音波検査 (UT) で検出することが比較的やさしかったが、今度のひび割れは向きもまちまちで曲がりくねったり、二股に分かれたりして、検出が難しい。そのため見落とされたり、深さの推定を誤ったりする。図2・4は、超音波検査で求めたひび割れの深さと、配管を切り出して測定した実際のひび割れの深さを比較したものである。データが30点あるが、そのうち4点は超音波検査で見つけられなかったものであり、また、実測値のほうが深かったものが大部分で、なかには超音波検査で2ミリの深さと判定したものが実際は9ミリや12ミリもあったものもある。このひび割れが超音波検査では見つけにくいタチの悪いものであることが分かる。

ひびだと思つとひびに見える検査員の主観に依存した検査結果

そこで超音波検査法を改良して挑んだ結果が図2・5である³。これは面目一新のため発電設備技術検査協会が新潟の柏崎刈羽原発で実施したもので、日立・東芝など国内検査メーカー各社のほか、GE (米国のジェネラル・エレクトリック社) など外国メーカーも参加し、また、検査方法もさまざまな方法が試みられた。この図をみてまず分かることは、図2・4とは反対に、実測値に比べ超音波検査のほうがひび割れの深さを大きく判定したということである。実測値が7ミリ弱なのに13・5

ミリとか11ミリに計測したデータ点がある。深さ5ミリのひび割れを10ミリ前後に計測したデータ点が多数存在する。

以前の検査ではひびを見落としたり過小評価したことが問題だったが、今度は、ひび割れを大きく見積もり過ぎてしまっている。超音波検査の判定が検査員の主観に基だしく依存していることが分かる。これを検査協会は、「安全側の評価になった」と自賛しているが、どんなものか。

ところでさらに驚くべき事実が隠されていた。いや、そつと目立たぬように「公表」されていたと言ふべきか。図2・5は、経済産業省の原子力安全・保安院の健全性評価小委員会に報告・説明された資料8・2の図から採ったものである。ところがこの図では、同日の小委員会に参考資料8・4として配布されたより詳しい報告書のいくつかの図には存在している実測値ゼロ、超音波測定値3〜6ミリのデータ点がすべて削除されていたのだ。これらのデータは、ひび割れでないものをひび割れとして計測したことを意味し、検査員は幻を見たことになる。超音波検査の信頼性はこんなものだと分かってしまった。各社選りすぐりの検査員がこの実証試験に馳せ参じたのであろうに。報告書の結言(78ページ)にはどういう文が書いてあるか。「国内会社の結果の多くが安全側の評価になっていること、無欠陥を正しく診断する点に関しては外国会社の技量には高いものがあること」。苦心の表現であるが、この意味を分かりやすく書けば次のようになる。「ひびの過大評価はあったけど過小評価はなかったので安全側だ、欠陥(ひび割れ)でないものをひび割れと診断してしまった国内メーカーの技量には低いものがある」。超音波検査の弱点を覆い隠し、こういう歪曲し

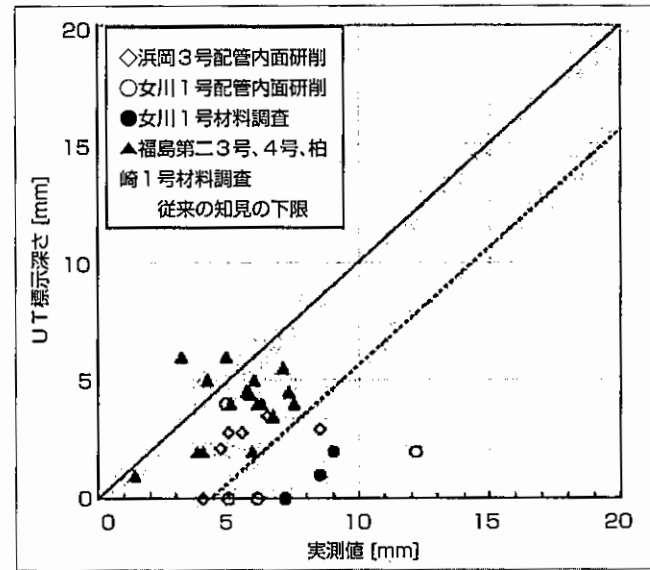


図2-4 超音波検査で推定したひび割れの深さ(縦軸)と切り出して実測したひび割れの深さ(横軸)の比較

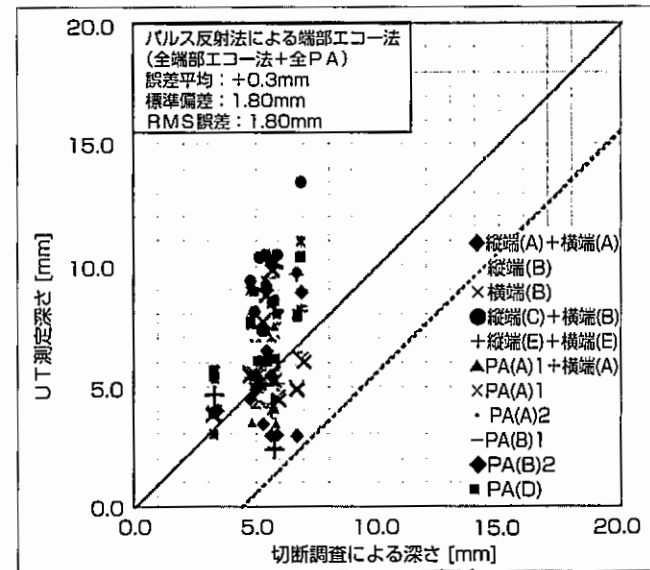


図2-5 「改良」した超音波検査で求めたひび割れの深さ(縦軸)と実測値(横軸)の比較

た結言の書き方をする検査協会が実施する原発の検査は信頼できるものになるだろうか。

超音波の検査法が「改良」・複雑化され、検査員の技量が要求されるようになり、原子力安全保安院は、原発専門の検査員を養成することにした。その資格試験を二〇〇五年から実施し始めたが、1回目と2回目を合わせた合格者は十数名に止まり、こんな状態で全原発55基の検査ができるのか心もとない。新体制スタート後もひび割れの見落としは続いている。東京電力は二〇〇六年三月、福島第二原発の配管検査（二〇〇五年五月）で全田周に達する長いひび割れを見落とししていたことを発表した。あまりに長過ぎたのでひび割れだとは思わなかったということである⁽³⁾。

ひび割れ隠し発覚以降、検査法の複雑化もあって、検査に携わる作業員の放射線被曝線量が急増したことが報告されている⁽⁵⁾。原子炉に近い放射線をあびる場所であるため、一人の検査員が長時間の検査はできない。こうした理由からも検査員の不足は深刻と言われている。優秀な技量を持った検査員が放射線をあびながらの作業を嫌い、他産業へ流出するというのももつともなことだ。人手不足とコスト削減から、原発の定期検査の間隔を現在の13カ月から2年に延長することが今年になって認められ、安全対策はますますおざなりになっていく。原発は労働の現場から崩壊しつつあると言えそうだ。

なぜひび割れを隠してきたのか

話をひび割れ隠し発覚前に戻そう。なぜ、電力各社は必死にひび割れの存在を隠したのか。それは、原発の機器には設計時と同じ性能が要求され、設計基準ではひび割れの存在は許されないからである。ひび割れが見つかれば即交換しなければならない。それでひび割れは報告しないことにした。その間、どういう管理をしていたのか。

ひび割れ隠しはかなり徹底していたようで、同じ電力会社の研究所の研究者にも知らせていなかったようである。ひび割れ発覚後、日本原子力学会材料部会は、シユラウド等材料問題検討会を開催したが、ひび割れの調査報告を行った東京電力研究所の研究者はその席上で、「人知の及ばぬことが起こりうる」と反省の弁を述べている⁽⁶⁾。

しかし、表面加工されたステンレス材 SUS316L にはひび割れが生じることはこの当時すでに GE などから多くの報告がなされていた。日本の原発で報告例がなかった（隠されていた）からと言って、たくさんいる日本の原子力材料技術者が誰も「人知が及ばなかった」のは残念である。不勉強なのか、想像力の欠如なのか。日本の技術は優秀で、アメリカの例のようなひび割れは起こらないとも思っていたのだろうか。

日本のエンジニアは内部告発しなかった

ひび割れが発覚したのは、GE（ジェネラル・エレクトリック社）の下請け会社の外国人技術者が通産省（当時）に内部告発したのが発端である。二〇〇〇年七月のことである。続いて同年十一月に2度目の告発がなされ、二〇〇二年五月になってやっと東電とGEは合同調査を開始した。この間、

告発を受けた通産省は何をしていたのだろうか。二〇〇二年八月二十八日、東電は不正を認める報告書を経産省原子力安全・保安院に提出、翌二十九日には保安院と東電が同時プレス発表を行った。東電職員100人近くが隠蔽に関与していたことが分かり、南直哉社長ら東電首脳は総退陣した。

告発したのは外国人の技術者で、事情を知っていた100人もの東電の技術者・職員は誰一人告発をしようとしなかった！　そこまでできなくても、この問題を取り上げて虚偽報告をやめるように働きかけた技術者もいなかったのだろうか。そういうことを許さない企業風土であることに、それらに抗して声を上げる日本人技術者がひとりもいなかったことに、寒々としたものを感じる。技術の現場はそこまで陰湿なものになってしまっているのか。技術を担うことの社会的責任を大学できちんと学生に教えてこなかったことも遠因のひとつだ。

急遽、「維持基準」が制定された

東電南社長は退陣するに際し「技術基準が実態に合っていない」と言い訳をした。これはシユラウドや再循環系配管のステンレス鋼のひび割れを防ぐことができないことを公言したようなものである。ひび割れ発覚を受けて、国と事業者はどのように動いたか。ひび割れをなくすのではなく、ひび割れがあつても原発を運転できるよう「維持基準」を導入したのである。

「維持基準」というのは「設計基準」とは別に、機器運転の基準を定めるもので、アメリカなどでも導入されており、それ自体、考え方としてよくないとは思わない。しかし、日本での導入の仕方はいかにも泥縄的であり、ひび割れ問題から逃げる目的があつたことは明白であろう。「維持基準」の導入は前々から検討を進めていたというのだが、いい機会だと一気に通してしまった。

運転の安全性を高めるために維持規格を作つて管理するというのならいい（それが建て前である）のだが、やっていることは逆なのではないか。今までなら、ひび割れが起きたら交換しなければならなかった配管に維持基準を設けて交換なしで済ませようというわけだ。コストを切り詰め、安全を切り詰めている。維持基準の考え方は、危険度の高い機器や部位を重点的に検査・管理し、総体として安全性を高めるのだという。しかし、実際には、検査にかけられる人手やコストの総量（これを「ポリウム」という）が決まっています、その範囲内で「合理的に」検査を実施するということだ。これはコスト優先の発想である。原発が老朽化してゆけば検査の「ポリウム」を増やさねばならないはずである。配管のひび割れ検査も10年とか5年に一度、しかも全数でなく、半数でよいというような規定がある。さすがにその通りには実施できなくて、現地住民の反発で規定以上の検査や交換が行われているようではあるが。

「健全」なひび割れか危ないひび割れかを判定する

各事業者が実施し、原子力安全・保安院の健全性評価小委員会が審査（承認）するひび割れの評価手順は次のようである。ひびを点検↓ひびのモデル化↓基準寸法以上ならばひびの進展予測↓ひびの補修。これは再循環系配管の場合であるが、炉心シユラウドも同様な手順によっている。ここで、

まず問題なのは、ひび割れの長さ・深さの認定である。これは超音波検査によって行うのだが、前に書いたように、その検査精度は疑わしい。ひび割れを見落としてしまえばそれまでである。

続いて、ひび割れの進展予測を行う。これは、超音波検査で求めたひび割れの大きさから、ひびの先端の応力（内部に生じる力の大きさやその作用方向）分布を計算で求め、ひび割れがどの位のスピードで進むかを推定するものである。応力分布の大きさを表す指標が応力拡大係数である。ひび割れの進み方は材質や環境によって違うので、材料の種別ごとに炉水環境を模擬した環境であらかじめ実験を行い、ひび割れ進展速度線図を作っておいて、それに当てはめて進み方を計算する。その計算の結果、5年後にひび割れがある範囲内にとどまっていれば、そのまま使つてよいと判定する。ここで問題なのは、実験室で作られたひび割れ進展速度線図が現実を反映しているかどうかである。実験データ点の上限を結んで低炭素ステンレス鋼（L材）のひび割れ進展速度を決めているが、確たる理論的根拠があるわけではない。実験データは大きくばらついている。データ点の数も少ないので実験が増えれば予測線をとび出す可能性もある。

しかも、必要なのはひび割れを受け加工硬化したステンレス鋼のデータであるが、それがなかった。実際、その後の実験で低炭素ステンレス鋼の熱影響部でのひび割れが進む速さは、硬化していない場合に比べて大きくなること が分かってきた（この実験が出る前は、進展速度が変わることはないと言っている著名な学者もいた）。

原子炉安全小委員会では、急遽それらの事実を考慮して、再循環系配管の溶接熱影響部（溶接の隣生じた塑性ひずみにより硬化した部分）に対しては、L材の線図でなく、進展速度の大きい鋭敏化 SUS304 の線図を便宜的に適用することとした。しかし、シユラウドに対しては従来のL材の線図でよしとしたままである。

これで十分に安全性に配慮した評価といえるかどうかは疑問である。塑性ひずみを受けた組織における応力腐食割れはL材が使用されるようになって新しく認識された現象である。鋭敏化した SUS304 以上のひび割れ進展速度を示す危険性がある。事実、その後の原子力安全基盤機構（JNES）での実験では、硬化したL材では鋭敏化材の予測線上がりぎりに達するというデータが得られているし、シユラウドで観測されている比較的低い硬化（工業用材の硬さの尺度「ビッカース硬さ200程度）でも、L材の予測進展速度を超えるデータが報告され、保安院の基準が安全側でないことを示している。

静岡県御前崎市の浜岡原発の差し止めを訴えた裁判（二〇〇二年六月）では、この問題で、私（井野）と中部電力側の証人が全く逆の証言をしたが、電力中央研究所の新井拓証人はJNESの報告書をきちんと読んでおらず、原告側弁護士^の追及に証言を撤回した。こういう裁判の経緯がありながら、静岡地裁（二審）の判決（二〇〇七年十月）では応力腐食割れに關しても中電側の主張がそのまま採用されて原告が敗訴するという意外な結果になった。

コラム1 大飯3号炉が大変なことになっている！

応力腐食割れが問題になるのは沸騰水型軽水炉だけではない。2008年6月16日関西電力発表の「原子力発電所の運営状況について」によると、福井県にある大飯発電所3号機（加圧水型軽水炉）の原子炉压力容器出口管台（ノズル）溶接部のひび割れが深刻な状態になっている。この溶接部は、压力容器の低合金鋼製の管台（ノズル）とステンレス製の压力容器のノズルとセーフエンドという部品をつなぐ部分である。1次冷却水のステンレス配管を压力容器に直接現場（原発のサイト）でつなぐのは作業上大変なので、あらかじめ、同じステンレス製の部品（セーフエンド）と低合金鋼製ノズルを出荷前にメーカーの工場で溶接しておく。そうすれば熱処理によって残留応力などを十分除去することができる。それで“セーフエンド”と呼ばれているのだ。

しかし、そのセーフエンドにひび割れが生じた。応力腐食割れらしいとのことだが、原発サイトでの溶接部ではなく工場での溶接部分でひび割れが生じるのは、あまりないことで、なぜなのかという疑問が生じる。傷の形状は、水中カメラで調べたところ、長さ約3ミリの軸方向の割れだった（図参照）。超音波検査で調べたところ傷の深さは浅いと考えられたので、表面から削り取る作業を開始したが、深さ3.6ミリまで削っても傷は消えず、傷の長さは約13ミリと逆に長くなった。さらに削ると工事計画認可申請書に記した配管の肉厚の限界70ミリを削ってしまうので、記載内容変更手続きを行って64ミリ厚でよいことにし、さらに、深さ4.6ミリまで削ったにもかかわらず傷の長さは相変わらず12.5ミリ残っていて、深さ10.5ミリまで削っても5.5ミリ残っていた。

このひび割れが軸方向に起こっているというのも通常の溶接部の応力腐食割れとは異なっている。ふつうは、溶接線に沿って周方向にひび割れができる傾向になる。どういう残留応力が作用したのだろうか。まさか、内圧による応力（フープ応力）で割れが拡がっていることはないと思うが。

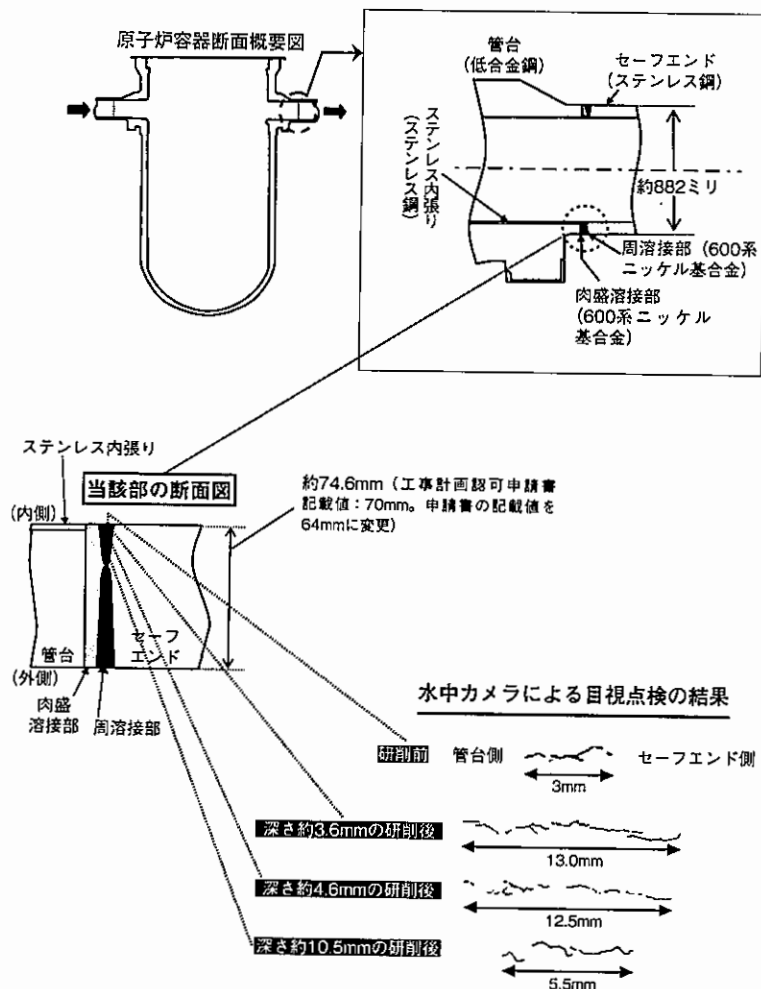
現在、傷の修復は中断されている。当然原発は止まったままで、2月2日に始まった定期検査が半年近くにのびている。傷の方向が軸方向なので超音波検査で深さを正確に調べられないようで、さらにどこまで削ればよいのか見当がつかない。あまり深く削れば管の肉厚が薄くなり150気圧の内圧にもたなくなる（その限界が本来70ミリ厚であり、それを64ミリに引き下げて削ったのだが、まだ足りない！）。

ひび割れを残したまま、しかもそのひび割れの深さも正確に把握できないまま、運転を再開し圧力をかけることは怖くてできないだろう。ひび割れを取るために、危険を冒してこれ以上、管を削るのだろうか。このノズルとセーフエンドを丸ごと交換することは不可能だ。なぜなら、このノズルは压力容器に取りつけられているので、压力容器をくり抜くことになってしまう。そんなことをすれば压力容器はもう使えない。大飯3号炉はどうなるのか？

その後の関西電力の発表（2008.8.8）によれば、傷が残っている幅約11センチ、周約13センチの部分で、64ミリからさらに53ミリまで薄くする変更手続きをおこなったとのことである。こういうことをして安全性はほんとに大丈夫なのだろうか。「もう危ないので、使うのはあきらめます」という選択は技術にはないのか？

大飯3号炉

原子炉容器の一次冷却材出口ノズルで見つかったひび割れ



今後は照射誘起応力腐食割れ（IASC）が問題になる

原子炉の運転期間が長くなると、中性子照射による材料劣化が問題になってくる。それは、次節に述べる圧力容器（低合金鋼）だけではない。シユラウドに使われているステンレス鋼でも、中性子照射によって応力腐食割れが引き起こされる。照射誘起応力腐食割れ（IASC）と呼ばれ、それはすでに始まっている。ステンレス鋼などの靱性材料（粘り強さを持つ材料）が一気に脆くなるので怖れられている。老朽化原発の今後の主要な対策課題のひとつである。

3 ■中性子照射で圧力容器は脆化する■

原発の寿命は40年と考えられていた

原発の寿命は、建設が始まった頃は40年と想定されていた。国や事業者は、そんなことは決まっていなかった、法律のどこにも書いていないと今になって言うが、一九七〇年代当時、事業者が作成した設置申請書には圧力容器の寿命を40年（実効運転期間32年）と想定して、容器鋼材が中性子照射によって脆くなる様子を推定している。また、一九八〇年代に将来の原発の経年変化について原研（日本原子力研究所）の研究者が書いた総説^⑧においても、寿命を40年と想定して議論を展開してい

る。これらのことから、原発建設が始まった当時は40年寿命が共通認識だったことは明らかだろう。40年を寿命とすれば二〇一〇年以降古い原発から次々と閉鎖されてゆくはずだが、そうはなっていない。住民の反対などで新規原発の建設が困難になっていることや新しい原発を建設するよりも寿命延長のほうが安上がりなことなどから原発の寿命を60年まで延ばして使う方針が決まり、建設から30年を超えた原発については各事業者が「高経年化技術評価報告書」を提出し、政府の「高経年化対策検討委員会」がそれらを審議して、10年ごとに60年まで寿命延長を認めることになった。今まで13基の原発について延長運転OKのお墨付きが与えられている。認められなかった原発は1基もない。

寿命を40年と想定した理由のひとつは圧力容器の照射脆化

当初寿命を40年と想定した理由のひとつが原発心臓部の圧力容器の中性子照射脆化だった。

中性子照射脆化とは何か。炉心の核分裂でとび出してきた中性子が炉壁に当たり、圧力容器の鋼材を壊してゆくのである。中性子が鋼に当たると結晶を構成している原子をはじきとばし、そこに空孔（vacancy）と呼ばれる穴と、はじきとばされた原子である格子間原子（interstitial atom）とができる。これらの格子欠陥は動き回って集合し、空孔クラスターや格子間原子クラスターを形成する（図2・6）。また、空孔が動くことで鋼中に含まれる不純物の銅原子なども集合体（不純物クラスター）を形成する。これらの2次欠陥が滑り変形を起こしにくくさせ、結晶を硬化させる（滑り

変形とは、金属結晶の内部のある結晶面をずらすように変形が進むことで、トランプのカードを斜め方向に押して滑らせるような変形である。

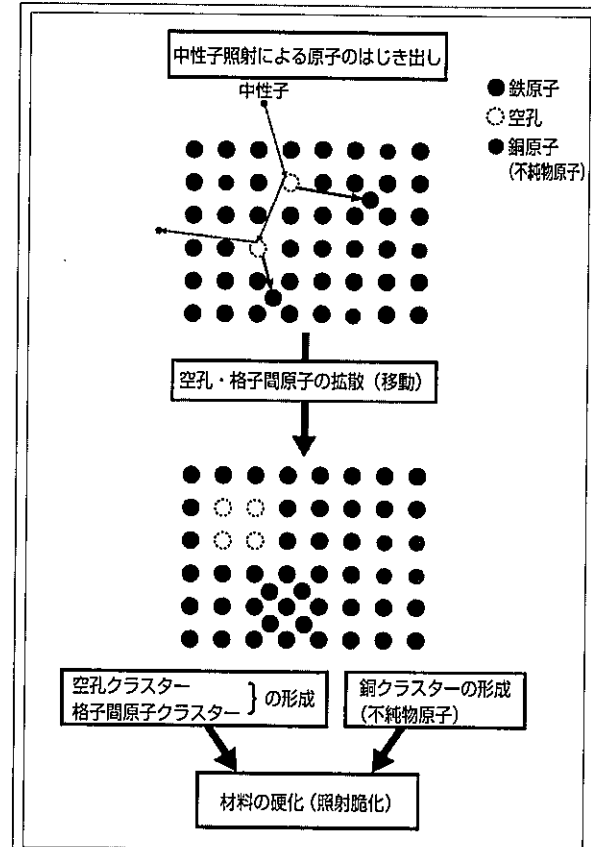


図2-6
中性子照射による金属原子のはじき出しと
クラスターの形成
クラスターが鋼の硬化を引き起こし、脆性遷移温度を上昇させる。

タイタニック号が沈没したのは鋼板の脆性遷移温度が高かったため

さて、鋼には延性・脆性遷移という現象がある。これは、ねばくて延性をもつ鉄がある温度以下になると脆くなる現象で、その変化が起こる温度を延性・脆性遷移温度——または単に脆性遷移温度という。無延性遷移温度と呼ばれることもある。リンや硫黄などを含む質の悪い鋼板では脆性遷移温度が高い。タイタニック号の鋼板の脆性遷移温度は、事後の調査で27度と分かり、これでは厳寒の海で冰山にぶつかった力での脆性破壊は免れなかったであろう。リベット(鉄)まわりから割れが発生し、船体の大破断に至ったという。

中性子照射を受けると脆性遷移温度は不可避免的に上がってゆく

原発の压力容器はそんなに質の悪い鋼材を使ってはいない。使用前の脆性遷移温度はマイナス1度からマイナス40度でいずれも0度以下である。しかし、この鋼が中性子照射を受けると時間とともに脆性遷移温度は上がってゆく。これは前述したように鋼中に格子欠陥クラスターや不純物クラスターができて滑り変形が起こりにくくなって、代わりにクラック(割れ目)による脆性破壊が先に起こるようになるからである。

原子力潜水艦の動力に使われる原子炉を別とすれば、原子炉の压力容器が冬の海で冰山に遭遇することはないが、地震などが原因で配管の破裂が起こると冷却水が失われ、炉心の空焚きを防ぐた

田中 三彦(たなか みつひこ)

一九四三年日光市生まれ。東京工業大学生産機械工学科を卒業後、九年間民間企業で原子炉圧力容器の設計などに従事。その後退社し、自然科学系の著述ならびに翻訳に従事。

著書——「原発はなぜ危険か」(岩波新書)、「科学という考え方」(晶文社) など、主訳書に「ホロン革命」(工作舎)、「複雑系」(新潮社)、「生存する脳」(講談社) 他。

井野 博満(いの ひろみつ)

一九三八年生まれ。東京大学工学部卒業。同大学院数物系研究科博士課程修了。工学博士。大阪大学基礎工学部・東京大学生産技術研究所・同工学部・法政大学工学部を経て、現在、東京大学名誉教授。

著書——「循環型社会を問う」(共編著、藤原書店)、「材料科学概論」(共著、朝倉書店)、「現代技術と労働の思想」(共著、有斐閣)、「金属材料の物理」(共著、日刊工業新聞社) 他。

上澤 千尋(かみざわ ちひろ)

一九六六年生まれ。新潟大学理学部数学科卒業。一九九二年より原子力資料情報室のス

タッフ。原子力発電所の事故解析および工学的安全性問題の担当。

著書——「東京湾の原子力空母」横須賀母港化の危険性」(新泉社)、「老朽化する原発」(原子力資料情報室)、「検証 東電原発トラブル隠し」(岩波ブックレット)、「MOX総合評価」(七つ森書館) 他。

武本 和幸(たけもと かずゆき)

一九五〇年 原発敷地の東五キロメートルの農家に生まれる。測量士・技術士・一級土木施工管理技士・住宅地盤調査主任技士。

六八年二月、受験生の際に敷地内地震調査を目標。その夏、新潟大学教養部の講義でプレートテクトニクス理論を聴く。

六九年九月の原発計画発表以来、反対運動に加わる。七二年、炉心変更で地盤に関心を持つ。七四年八月原発地盤論争提起。農業の傍ら土木調査・計画・設計・施工管理に関わる。七五年四月、九九年四月、羽刈村村議会議員。

一九六四年新潟地震、二〇〇四年中越地震、二〇〇七年中越沖地震を経験。

二〇〇四年中越地震、二〇〇七年中越沖地震では災害調査や住宅復旧計画に関わる。

只野 靖(ただの やすし)

一九七一年二月生まれ。早稲田大学法学部卒業。二〇一〇年十月弁護士登録(第二東京弁護士会)。東京共同法律事務所所属。

主な担当事件——浜岡原子力発電所運転差し止め訴訟。八ッ場ダム建設反対住民訴訟。PLCによる電波妨害差し止め訴訟。ホトケドジョウ自然の権利訴訟。米軍横須賀基地原子力艦船上空の航空機飛行制限等請求事件。近未来通信被害者対策弁護士(事務局長)。その他、労働事件、欠陥建築事件、クレサラ被害事件、先物被害事件等の一般民事事件及び刑事事件多数。

山口 幸夫(やまぐち ゆきお)

一九三七年新潟県生まれ。一九六五年東京大学大学院数物系研究科博士課程修了。工学博士。物性物理学専攻。米ノースウエスタン大学、東京大学などを経て、原子力資料情報室共同代表。

著書——「理科がおもしろくなる12話」新版20世紀理科年表」(共に岩波書店)、「エントロピーと地球環境」(七つ森書館) 他。

まるで原発などないかのよう
——地震列島、原発の真実

二〇〇八年九月十五日 第一版第一刷発行
二〇一一年四月二十五日 第一版第四刷発行

編者 原発老朽化問題研究会
発行者 菊地泰博
発行所 株式会社現代書館

東京都千代田区飯田橋三二二一五
郵便番号 10210072
電話 03(32221) 1321
FAX 03(32262) 5906
振替 001200383725

組版 デザイン・編集室エディット
印刷所 平河工業社(本文)
製本所 東光印刷所(カバー)
装丁 矢嶋製本
中山銀士

校正協力/岩田純子

©2008 Citizen's Research Group on Nuclear Power Plant Aging Issues Printed in Japan

ISBN978-4-7684-6971-2

定価はカバーに表示してあります。乱丁・落丁本はおとりかえいたします。

http://www.gendaishokan.co.jp/

本書の一部あるいは全部を無断で利用(コピー等)することは、著作権法上の例外を除き禁じられています。但し、視覚障害その他の理由で活字のままでは本を利用できない人のために、営利を目的とする場合を除き「録音図書」「点字図書」「拡大写本」の製作を認めます。その際は事前に当社までご連絡ください。また、テキストデータをご希望の方は左下の請求券を当社までお送りください。

活字で利用できない
テキストデータ
「まる」