

原子力発電所と共に歩いて40年

—新たな原子力時代を拓く原子力社会工学領域の創設—

大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻 教授

中村 隆夫

1. はじめに

3月11日、我が国観測史上最大とされるM9.0の「東日本大震災」が発生し、それによって引き起こされた津波により2万人を超える死者・行方不明者が生じる大災害となりました。冒頭で、この地震の犠牲者に深く哀悼の意を表するとともに、被災された方に心よりお見舞いを申し上げます。また、この地震と津波により福島第一原子力発電所では国際原子力事象評価尺度(INES)でレベル7というシビアアクシデントが発生し、今なおその対応が続いている状況にあります。

このような時に、原子力のこれまでの活動と今後の展望について述べることは勇気のいることですが、これが原子力の終わりではなく、新たな始まりの一步であるという気持ちで本稿を書かせて頂きました。

2. 原子力時代の始まり

手許に「原子力時代」と書かれた古ぼけた小冊子(図1)があります。パソコンで検索して頂くと、それが戦後まもない1946年に出版された少年向けの「原子力」を紹介した本であることが分かります。この本が原爆投下で戦争が終わって一年も経たない時に書かれたことに驚きを感じると共に、当時原子力が資源の乏しい日本の希望の星であったであろうことが想像されます。

その本は、私が少年時代に実家の押し入れの中で見つけたもので、恐らく歳の離れた兄がやはり少年時代に、といっても戦後まもない時期に興味を持って買ったものだと思います。そこには、原子力の持っている莫大なエネルギーが未来の社会の豊かな生活を約束するものとして描かれています。

それがきっかけとなった訳ではありませんが、私が原子力に興味を持ち、大学で原子炉工学の勉強を始めたのは、その本が出版されてから20年余り経った1970年のことです。丁度、大阪万博で美浜発電所から送電された原子力の電気がニュースになった頃でした。

大学では、東海村に新たに建設された高速中性子源炉「弥生」の最初の炉物理試験に係りました。電力会社に就職してからは、美浜・高浜・大飯と、建設現場を次々に転勤し、文字通り加圧水型(PWR)原子力発電所の導入の歴史と共に歩いてきました。大学の研究炉「弥生」もこの3月に40年の運転の幕を下ろしました。また、我が国にPWRが根を下ろした発祥の地である若狭の町には、当時、数十名の米国から来た原子力技術者が家族と共に過ごした外人社宅や外人小学校があったことを知る人も少なくなりました。最近になり、我が国のプラントメーカーが海外において原子力発電所を受注する話を聞くにつけて、当時パイオニアとして異国の地に家族と共に発電所建設にやって来た米国技術者の気概もいかばかりのものかと思うこの頃です。

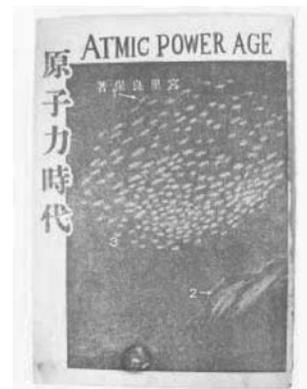


図1 「原子力時代 (宮里良保著 1946年)」

地球温暖化防止の有望なエネルギー源の一つである原子力発電所の国際展開は21世紀にわが国が担うべき重要な役割であり、それを担う人材の育成が大学に求められています。これまで原子力発電と共に歩いた40年間を振り返り、これから始まる新しい原子力時代を乗り切る上で、またそれに取り組む人材を育成する上で参考にして頂きたいと思います。

3. この40年で大きく変わったこと

私が電力会社に入社した頃は、まだ原子力発電所は東海村のコールドホール型のガス炉とPWR・BWRの初号機が運転をしているのみでした。それが現在では50数基が運転され、我が国の主要電源となっています。

それだけではありません。今や我が国の技術で設計された原子炉が海外に輸出され、建設されようとしているところまで来ています。原子力発電所の市場はグローバル化し、今度は、日本の技術者が海外での原子力発電所の建設に活躍する時代になりました。しかしその時に忘れてはならないことに、規格・基準 (Codes and Standards) があります。

40年前には米国の規格・基準で設計された原子炉が我が国で建設され、根を下ろしました。その後、我が国では米国の規格・基準を翻訳して独自の改良を加えながら国内の基準体系を整備してきました。国際化の下では共通のルールとなる規格・基準の重要性がますます高くなります。はたして我が国の規格・基準は国際的に通用するのでしょうか。今の日本は、規格・基準においてはようやく開国の時を迎えており、これからの飛躍のためには、規格のグローバル化に向けて大きく舵を切っていかなければならなくなっています。

4. 原子力発電所建設のフロンティアスピリット

大学での炉物理 (Reactor Physics) の世界から電力会社に入社し、最初に飛び込んだのは、巨大な鉄とコンクリートの塊のような原子力発電所の建設現場でした。当時、福井県では2基の軽水炉が運転し、更に敦賀、美浜、高浜、大飯の4か所の地点でPWRと新型転換炉 (ATR) の建設が進む我が国原子力の最先端の職場でした。

PWRにおいては、2ループの美浜1号機 (図2)



図2 運転開始40年を迎えた美浜1号機
(右側から、1号機、2号機、3号機)

に続いてその出力向上型である2号機が試運転に入り、続いて更に出力を高めた3ループの高浜1,2号機が建設中、4ループの大飯1,2号機が建設準備中でした。美浜での1年間の実習を終えて配属された高浜1,2号機の建設現場では、米国ウェスチングハウス社から輸入されたPWRプラントの建設そして試運転のため、数十名の米国技術者が電力会社とプラントメーカーの指導・監督のために派遣されていました。

彼らは一部の年輩者を除けば家族を帯同し日本に来て、数年間若狭の地に作られた数十戸のプレハブの外人社宅に住んでいました。生活はまったくのアメリカ式で、今言うところ3LDK (リビングダイニングに3つのベッドルーム)を思い思いのインテリアで飾った、今なら当たり前前の完全冷暖房完備の住宅に住んでいましたから、当時の日米の生活レベルの差を感じたものでした。小学生は近くに小さな外人小学校が作られ、英語での教育がなされ、中学生以上は神戸のアメリカンスクールに寄宿し、週末になると親元に帰ってくるか、親の方が車で神戸の買い物を兼ねて遊びに行く生活をしていると聞きました。建設現場にある事務所にもそれぞれに個室があり、マネージャーにはタイピスト兼秘書がついて、設計図書やレターは全てファイリングされるなど、米国式の職場でした。一番新鮮だった経験は、炉物理試験の実施のために米国から専門家 (Core Physicist) が派遣されてくるのですが、大飯に派遣されてきたのは工科大卒の女性 Physicist で、単身で日本に乗り込んでピッツバーグの本社の指示を受けながら我々日本人の技術スタッフを指揮して、堂々炉物理試験を進めていく姿を見て、米国人のフロンティアスピリットを感じました。将来はあのように仕事をしてみたいと憧れたことを思い出します。

米国からの輸入プラントの建設工事で我が国とのやり方の違いが明らかな事例に、工事計画認可制度があります。一言で言うと、米国では原子炉圧力容器の構造強度の設計は、後述するASME (学会) 規格¹⁾に基づいて行われ、そのチェックはPE (Professional Engineer) の資格を持った電力やメーカーの技術者が行い、国の規制は関与しません。ところが我が国では、強度計算書は国が出した告示に基づいて国が確認する対象となっていたため、事前に提出して認可が必要でした。この違いから、米国で設計変更が行われて設計図書が改定されると、その都度、認可手続きのために東京にある通産省 (当時) に行つて説明が必要で

す。より大出力の軽水炉をということでPWRでは電気出力135万KWのAPWRが開発されましたが、そこには、シビアアクシデント研究の成果を活かした確率論的安全評価（PSA）を設計に取り入れるという新しい考え方が導入されました。

PWRのシビアアクシデント評価では、一次冷却材喪失事故（LOCA）が主要な起因事象となります。従って、そのリスクを低減するために緊急炉心冷却系（ECCS）を従来の2系統から4系統に増加し、電源を必要としない静的（パッシブ）機能を持たせる改良設計が提案されました（図5）。この新しいAPWRの建設は計画中の日本原電敦賀3,4号機でようやく実現する予定です。

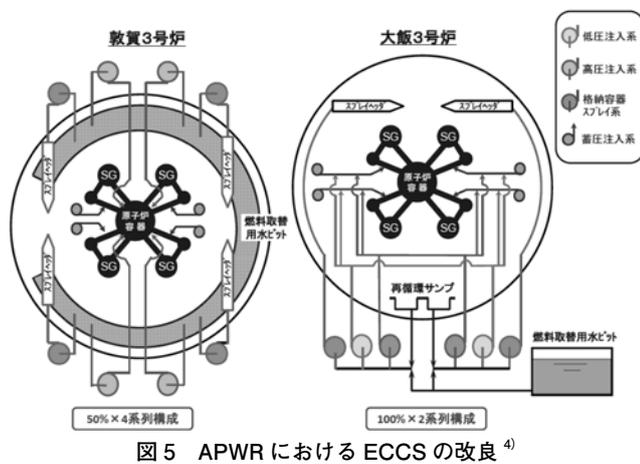


図5 APWRにおけるECCSの改良⁴⁾

その後、米国では、シビアアクシデント対策としてTMI事故の原因のひとつであった事故時の運転員の操作ミスを低減することと、原子力発電所の建設を推進するために建設コストと工期を低減する目的で官民の協力により、図6,7に示す様に静的機能を更に強化すると共に、異常発生時に作動する安全設備自体の簡素化を進めて、設備や保全活動の物量を低減しようとする新たな技術開発が行われました。それがAP-600,1000と言われるPWRです。

この原子炉の特徴は、原子炉の冷却ができなくなるような事故が発生しても、3日間以上運転員の手を借りず、かつ動力源が無くても原子炉と格納容器の冷却を可能にするという設計思想（Grace Period：神から賜った時間）が取り入れられると共に、保全作業の物量を低減するために、異常時に対応する安全設備を従来の軽水炉よりも大幅に簡素化した設計を採用したところにあります。

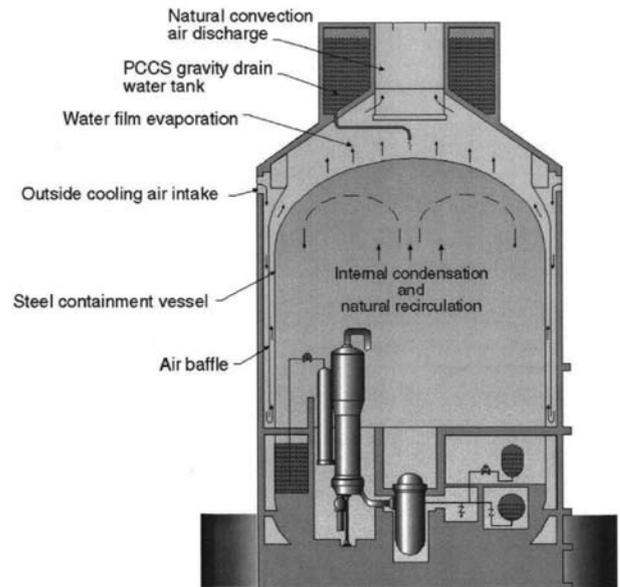


図6 AP-1000の静的格納容器冷却系⁸⁾

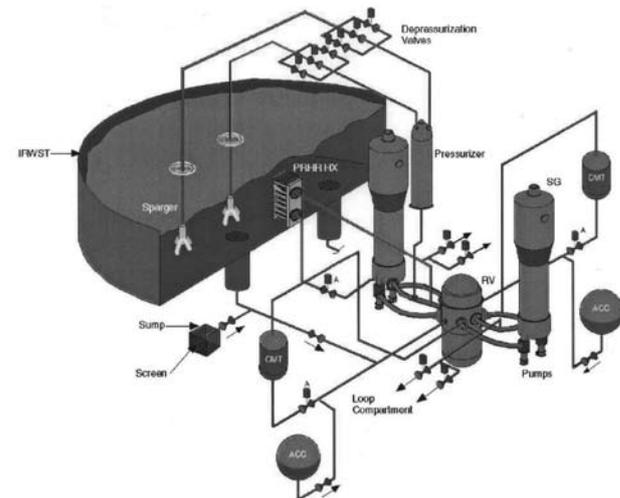


図7 AP-1000の静的非常用炉心冷却系⁸⁾

この設計を実現するためには、開発をメーカーだけでなく実施するのではなく、最初から規制側である米国規制委員会（NRC）が協力して、国の規制のルールについても開発と合わせて検討する体制を取る必要がありました。この新しいPWRは今や中国で大々的に建設が進められており、今後、米国等でも建設が進められる予定です（図8）。

この様に原子力発電所においては、安全確保のルールが安全性のみならず、経済性や引いては技術競争力にも大きな影響を持っており、新しい安全の概念を取り入れる柔軟性が求められるグローバル化時代が原子力でも始まってきていることを十分考える必要があります。



図8 AP-1000の完成予想図⁹⁾

日本における軽水炉開発の歴史については、日本原子力学会が2009年に発行した、「軽水炉プラント—その半世紀の進化の歩み」⁹⁾に詳しく載っておりますので参考として頂きたい。

7. シビアアクシデントとアクシデントマネジメント

事故はあってはならないものですが、残念ながら原子力開発においては事故によって学び、技術が大きく進歩した事例は少なくありません。過去にいわゆるシビアアクシデントと呼ばれる大事故が世界では2回起きています。スリーマイル島（TMI）事故とチェルノブイル事故です。それ以外にも国内外で様々な事故が起きました。小さな事故でもそれによって学ぶことは多く、美浜2号機の蒸気発生器伝熱管破断事故、東電の事故隠し問題、JCO事故、美浜3号機の復水管破断事故など、その度に新たな技術の進展やルール作りが行われてきました。しかし、事故の教訓の面から、また国際事故評価尺度（INES）においてもこの2つに匹敵するものはありません。

この2つの事故は、原子炉の炉心が大きく損傷し大量の放射性物質を放出して、周辺住民の避難を余儀なくされたいわゆるシビアアクシデントです。TMI事故の発生により、設計を超えるような事象に対して安全を評価する「確率論的安全評価手法（PSA）」が大きく進歩しました。また、チェルノブイル事故では、組織文化としての安全意識の醸成という、いわゆるセイフティカルチャの重要性が強く認識されました。

我が国でも、それまで研究に留まっていたシビアアクシデント評価技術を活用して、設計を超えるような事態になった時に炉心損傷や格納容器破損を防止し、周辺住民の過度な放射線被ばく事故のリスクを下げる

ための様々な対応策、いわゆるアクシデントマネジメントの整備方針が1994年に取りまとめられ公表されました。そして、それを具体化するための設備の改良が数年に亘って続けられ、その結果、原子力発電所の安全性を大きく向上することができました。

8. 原子炉主任技術者の役割

1990年代に入ると、勤めていた電力会社で11基続いた原子力発電所の建設計画が途絶え、建設部門の組織が廃止されることになりました。それまで20年間ずっと発電所の建設に従事していたのですが、それからは運転している発電所を運用管理（マネジメント）する側に回りました。幸い大学での原子炉工学の専門を活かして原子炉主任技術者の国家資格を持っていたため、かつて設計に携わった高浜3号機の原子炉主任技術者として働くことになりました。

原子炉主任技術者は、原子力発電所に必要な3つの主任技術者（原子炉、ボイラータービン、電気）の中で最も重要な役職です。筆記試験に合格した後、6か月以上の原子炉の運転経験を経て、口答試験に合格すると科学技術庁長官（当時）より免状が与えられます。もう50年以上の歴史がありますから、述べ1000名以上の原子炉主任技術者が日本にはいるはずですが、電力会社においては資格を持った人材の不足に悩んでいるのが実情です。筆記試験は、原子炉物理、運転制御、設計、材料、放射線管理そして法令の6科目で幅広い原子炉に関する知識が求められます。私が大学で在籍している環境・エネルギー工学専攻は、まさにこのような専門技術者を養成する役割を担っており、将来、原子力発電所長を補佐し安全確保の要となる専門人材の輩出に努めたいと思います。

9. 国際協力（トルコでの技術支援の経験）

原子力発電所での勤務の後、国際原子力機関（IAEA）の要請により、トルコ共和国の原子力発電所導入計画の技術支援のため、トルコ電力に行く機会がありました。2000年前後の頃でした。トルコは大変な親日国ですが、日本と同じくエネルギー資源に乏しく、国防上からロシアの天然ガスへのエネルギー依存を減らすために原子力発電の導入が長年の悲願です。

私が行ったのは、2度目の国際入札の時の技術評価支援で、その時は米国のウェスチングハウス社の

PWR、ドイツの PWR そしてカナダの CANDU 炉が候補でした。当時日本に建設された PWR が世界の最新のウェスチングハウス型 PWR であったため、そのオーナーである電力会社の技術者に技術評価支援の要請があったわけです。

当時、トルコの電力会社は国営の発送電会社 (TEAS) と民営化された配電会社 (TEDAS) に分かれています、どちらも首都アンカラにある同じ本社ビルに入っていました (図 9)。



図 9 トルコ電力本社ビル (2000 年当時)

トルコ電力 (TEAS) は完全に欧米型の会社で、マネージャーは皆個室に入っており、私は 1 週間滞在したのですが、日本の原研に留学した経験があるというマネージャーと同じ部屋に入り、毎日、朝から晩まで技術スタッフが技術仕様書のレビューをするときに出てくる疑問に答えるのが仕事でした。女性の技術者もいますし、本社のすぐ横には会社の託児所もあって日本よりも遥かに男女雇用均等制度が進んでいます。その時に質問の中にはこんなものもありました。

日本の原子力発電所従業員の年間の放射線被ばく量はドイツと比べて高いのはなぜか。資料を見ると確かに高いのです。実態は、毎年ドイツと比べてはるかに多くの機器の分解点検をしているからなのです。また、どんな規格に基づいて設計しているのかという質問もありました。日本の規格・基準は英語になっていませんから答えようがありません。米国の ASME 規格とほぼ同等の日本の規格で設計していると答えるより他はありません。日本の原子力設備は品質が優秀で海外にも輸出されるようになりましたが、それらは全て海外の規格に基づいて設計・製作されています。

10. 米国機械学会 (ASME) 圧力容器規格

原子力発電所の最重要機器である原子炉圧力容器、まさしく原子炉の心臓に当たる機器は、米国機械学会

(ASME) 規格の原子力設備設計・建設規格 (Sec.III) に基づいて設計・製作されます。この 1963 年に初版が発行された規格は、今尚世界の全ての原子炉圧力容器規格のベースとなっています。「解析による設計 (Design by Analysis)」の考え方を世界で初めて取り入れて安全率を大幅に合理化したこの規格は、世界で最も有名な規格の一つと言えるでしょう。我が国が原子力を導入した当時はまさに天の声 (バイブル) でもあったこの規格を策定する委員会に多くの日本人技術者が委員 (メンバー) として参加するようになったのはこの 20 年足らずのことです。

ASME Sec.III 規格が日本の規格に取り入れられたのは、1980 年に通産省告示 501 号が出された時からです。当時は、前述した通り、米国の学会規格を国が勝手に翻訳して国の規制基準として使用していました。原子力のみならず、我が国の全ての圧力容器規格は ASME 規格を翻訳したものであり、ほとんどコピーと言っても良いものです。

ASME 規格は規格に精通した多くの職業技術者のボランティア活動によって策定されます。彼らは年に 4 回、米国の主要な都市を持ち回りで開催される 1 週間の会合 (Code week と呼ばれる) に出席し、規格の年 2 回の追補の発行と、3 年ごとの大改訂を行います。彼らは、会社や官庁あるいは研究所で仕事をしながら、その専門知識と豊富な業務の実務経験、特に規格策定活動を通じて得られた規格作りそのものに対する知識と経験を活かして学会の規格活動に参加しており、規格の専門家 (Code engineer) として社会から敬意を持たれる存在となっています。ASME のコードブック (図 10) の表紙の後には、規格委員会に参加している数百名のメンバー (委員) リストが掲載されており、規格作りに関する数十年のキャリアを有す



図 10 原子力の ASME 規格 (コードブック)
右から Sec.XI、Sec.III (3 冊)、Code case (2 冊)

る技術者は企業を退職してからも、コンサルタントをしながら委員会活動を継続する場合がよく見られます。コードエンジニアの活動については、原子力学会の和文論文誌に収録されている拙論文を参照ください。¹⁰⁾

我が国の原子力における規格体系を米国の ASME 規格のような新しい技術知見が迅速に取り入れられる仕組みに変えることは、これら規格に携わる者にとっての長年の夢であり、それがようやく実現したのは高々十数年前に過ぎません。その実現のために、私も多くの日本人技術者と共に、米国で年 4 回開催される委員会に長年参加し、その仕組みと活動の取り組みを日本に取り入れてきました。

ASME 圧力容器規格の委員会組織は、統合管理委員会の下に、各 Section 毎の委員会があり、その下に多くのサブグループ（分科会）とワーキンググループ（作業会）から構成されています。委員になるのは、簡単ではありません。最初はビジターとして議論に参加し、実力が求められると正式の委員に推薦されることになり、その時には技術者としての倫理規定に署名することになります。技術者にとって最も重要なことは、人類の福祉（human welfare）の増進にその知識と技能を用いること、社会と雇主及び顧客に対し誠実、公平・忠誠であること、技術者としての能力と信望を高めるよう努めることであるとされています。そして最初が一番下の作業会に属して経験を積み、徐々に経験を積んで、より重要な役目を任されることとなります。

私は、ASME での委員会の委員を 10 年近く務めました。その時の経験は、日本の学会での規格作りと委員会運営に大変役に経ちました。今では、日本原子力学会、日本機械学会、日本電気協会に ASME と同じ様な委員会が設置され学会規格作りが進められています。

11. 耐震設計審査指針の改訂と地震 PSA

日本は地震国です。それは日本列島が 4 つの大きなプレートがぶつかり合うところに位置し、太平洋プレートとフィリピン海プレートの沈み込みによってプレート境界地震が繰り返し起きることによります。このため、原子力発電導入の当初から耐震対策は大きな課題であり、審査指針を整備すると共に世界のトップを行く耐震対策を取ってきました。

しかし、国の基準に最新技術知見が反映されるのは時間のかかるものであり、1981 年制定当時は世界最新であった「耐震設計審査指針」も兵庫県南部地震の起きた 1995 年にはその後の技術の進歩の反映が必要となっていました。指針を早く改訂すべきとの多くの意見をもとに原子力安全委員会は数年の準備期間を経て、2001 年より指針改定の検討に着手しました。2006 年に指針が発行されるまで数十回の委員会が開催されましたが、この間、電力側参加者として委員会に出席してきました。

新指針の特徴は、耐震設計において用いる基準地震動の策定方法を最新の知見を基に高度化したことと、基準地震動を超える地震の発生が否定できないものとし、その「残余のリスク」を合理的に達成可能な限り小さくする努力を払うため、地震時確率論的安全評価（PSA）の導入を進めたことです。

これを受けて、原子力発電所の基準地震動の見直しが行われ、より大きな地震動を設定して安全確認を行う「耐震安全確認」が行われるとともに、耐震余裕を更に向上させるための工事が行われて、より災害に強い発電所に向けた活動が進められています。

一方では、日本原子力学会では、残余のリスクを評価するための地震 PSA 手法の標準として、AESJ-SC-P006-2007「地震 PSA 実施基準」を発行し、今後、地震によって大事故にいたる重要な事故シーケンスの分析に活用され、アクシデントマネジメントの検討に役立てることが期待されています。

12. 福島第一原子力発電所事故

今、世界の原子力発電は、未曾有の危機に直面しています。世界で最も安全で信頼性の高いと言われていた日本の原子力発電所が、東日本大震災によって引き起こされた大津波によって、4 基の原子炉にシビアアクシデントが発生する事態に見舞われました。

私は長年シビアアクシデントや耐震研究に携わってきましたが、まさか日本でこのようなことになるとは想像できませんでした。多くの原子力技術者がこの事故により、改めて原子力の持つリスクの大きさとリスクマネジメントの重要性を認識したと思います。

福島事故の全貌については、今後の調査に委ねさせて頂き、ここでは、これまで原子力に深くかかわってきたものとしての反省と今後取り組むべきことについて述べさせて頂きます。

第7章で紹介した過去の2つのシビアアクシデントはいずれも運転員の誤操作や規則違反、そして設計不良や故障が原因で発生しましたが、今回の福島事故の原因は地震による津波であると考えられており、自然災害が起因でした。もともと、原子力発電所では、立地段階から災害のおこるおそれの少ない地点を選び、更に想定される自然災害に対して安全性を確保できる設計を要求しています。一方で、第11章で述べたように私たちは地震への備えを通じて、地震の想定には上限がないことを学び、「残余のリスク」の評価により、可能な限り地震による事故の発生の可能性を小さくする努力を求めてきました。しかし、今回の福島事故の発生により、設計を超える事象のリスクを予測して災害を未然に防ぐシステム作りには日頃から取り組むことがいかに大切か身を持って知ることとなりました。

原子力の安全確保は、原子炉が内包する放射能を閉

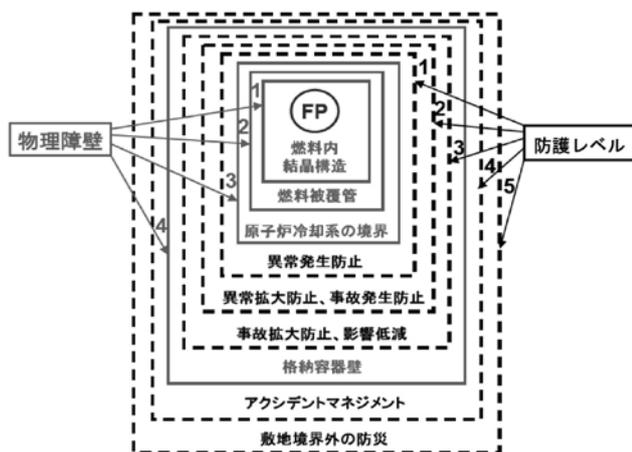


図 11 IAEA における物理障壁と防護レベル

じ込め、その危険から一般公衆を防護することにありますが、そのためには、図 11 に示す様な安全防護対策について、その思想の原点に返って再構築する活動を進めていくことが、原子力に関わる工学者に求められていると思います。

13. 終わりに

本稿が皆様の手元に届くころには、福島事故において原子炉の安定冷却が確保され、環境への放射能放出

のおそれが軽減されていることを切に願う次第です。

さて、これまでの約 40 年間、原子力発電所と共に歩んだ日々の経験とスピリットを次の原子力を支える人材に託すのが使命と思い、その時に起きたこと、感じたことを紹介させて頂きました。産業界での経験を大阪大学での研究や教育に反映すべく、環境・エネルギー工学専攻の下に「原子力社会工学領域」という研究室が新たに設置され、原子力に支えられた社会における工学的諸問題への対応について検討を進めたいと考えております。これからの原子力開発においては、現在まさに直面している福島事故の対応も含め、これまでに倍加する困難と苦労が私どもの前に立ちほだかるものと想像しますが、それを跳ね返して未来を切り開く国際的な原子力技術者が大阪大学から多数輩出されるように尽力してまいります。

今大学で勉学に励んでおられる若い技術者の方々、新しい原子力時代は皆さんの活躍を待っています。日本の技術力が国際社会において大いに発揮されるようフロンティアスピリットを持って邁進してください。

<参考文献>

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components 2010
- 2) 旧通商産業省告示 501 号 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準
- 3) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2009 年版
- 4) 日本原子力発電株式会社資料より
- 5) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.XI, Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components, 2010
- 6) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 2009 年版
- 7) 原子力施設運転管理年報 平成 21 年版
- 8) 第 14 回原安協シンポジウム 安全性から見る革新的原子炉システム 講演資料「AP-600/1000 に代表される米国の原子力推進の取り組み」
- 9) (社) 日本原子力学会 軽水炉プラントーその半世紀の進化の歩み 2009 年 12 月 18 日発行
- 10) 学会規格作りとコードエンジニアの役割 日本原子力学会 和文論文誌 Vol.9, No.1, pp.1-12, 2010

(学界)