

これからの原子力安全研究と大学への期待

原子力安全委員会委員長 松浦祥次郎

京都大学原子炉実験所 40 周年記念講演会で講演する機会を戴き、非常に光栄に存じております。しかしながら、私の正直な気持ちは、「何故に私が？」でございます。しかし、考えてみますと、私は、臨界実験装置(KUCA)計画が進められる頃から、頻繁に実験所と行き来がございました。また、第 3 代所長柴田先生以来の歴代所長とも何らかの関係がありまして、厚かましくも講演を引き受けた次第であります。本日は「これからの原子力安全研究と大学への期待」ということで、原子力安全委員会に参りまして以来起こりました原子炉の事故・トラブルから判じまして、技術的に考えて、どういう点が大きな問題であるかを、率直に述べさせて頂きたいと存じます。

その前に、多少、京都大学原子炉実験所について、思い起こされることをお話させていただきます。私が日本原子力研究所に入所した頃に、KUCA 計画ができ、それに参画させて頂きました。KUCA の特徴は、複数の臨界集合体を持ち、それが加速器と結びついている点であります。これが、多くの研究者・技術者を育てる上で大きな役割を果たしたと思っております。しかも、集合体を複数持つ構想は、後に、原研の臨界安全研究施設 NUCEF(Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility)にも、思想的背景として取り入れられました。そして、この NUCEF での研究により、JCO 臨界事故を的確に収めることができました。研究は次々に繋がるものだと改めて思っています。次の「KUR-II 計画と INFCE(WG-8)」ですが、米国カーター政権時、核拡散が問題となり、INFCE(International Nuclear Fuel Cycle Evaluation)が世界的規模で議論されました。当時の最大の論点は、日独が進めようとしていた使用済み核燃料の再処理と高速増殖炉計画の可否でしたが、私も参加した WG-8 では、米国が提案した新しい核燃料サイクルの可能性と研究用原子炉の高濃縮ウラン(HEU)燃料の核拡散危険性が検討されました。この時に議論した Th サイクルが、以降の KUCA での研究の柱の一つになったと思います。また、HEU 燃料の低濃縮(LEU)燃料への転換も議論されましたが、この頃、KURRI では 2 号炉(KUR-II)計画が出されておりました。このような世界情勢の中で、KUR-II 用 HEU 燃料を確保するための交渉は非常に困難でしたが、京大炉グループのご努力の結果、最終的には HEU を入手でき、確保された HEU 燃料が現在の KUR で使用されております。さらに、新核燃料サイクルを検討した時、加速器駆動炉のアイデアは既にありましたが、最近この研究が本格的に始まり、大きな流れの中で原子力研究が進んでいることが分かります。一方、核拡散の問題は未だ世界的に難しい問題として残されています。

今日の主題である安全のお話ですが、原子力安全研究というのは、「基本的に安全を大前提とする原子力利用に関して、安全という状況を作り出すために必要な知恵を得る」という研究であり、ある特定の専門分野を示しているものではありません。原子力利用を進めると、それに応じて、安全規制面でも的確に対応しなくてはなりませんし、常に最新の技術を使い、かつ、その知見を安全規制に反映しなくてはなりません。最新の技術的な知見が十分に反映されなかったことが、現在の難しい問題を生んでいると思います。それから、当然、安全性の基礎となる知見を蓄積し、さらに、安全を維持する基盤としての技術水準

の向上やその人材確保が必要です。このために、原子力安全委員会では、安全研究の年次計画を策定しております。

国の安全研究の目指している所は、安全規制の要求に応えられる研究であり、安全審査等に係わる各種指針や判断基準となるデータを整備することです。しかし、今は、原子炉施設の事故・故障の分析や安全評価手法の規制への活用に、その重点が移りつつあります。というのは、最近では、稼働中の原子炉が十分安全に動く事が大切であり、そのための安全評価やトラブルを正確に分析するための知見等が重要であるからです。その他の安全研究のテーマとして、放射線の人体への影響、安全性の向上、そして、原子力災害時の防災対策等に関する研究があります。

安全研究の年次計画は、原子力安全研究専門部会のそれぞれの分科会で検討をして頂いております。この専門部会部会長は、実験所で研究をされておりました木村逸郎先生であります。

現在の安全研究についてですが、全ての研究を、国の資金で活動している安全研究機関やその他の機関、また、一部分は大学に依存しております。これまでは大学への依存は少なかったのですが、独立行政法人化後は、安全研究への重みも強くなると思われれます。原子力安全委員会が平成13年～17年の安全研究における重点分野として挙げているものの中には、今後重要になる軽水炉燃料の高度化、軽水炉の高経年化・廃止措置等があります。それから、再処理に関する対応や臨界安全の研究があり、ソフトウェア的なリスク評価の研究が重要になります。その他指摘されている重点分野は、JCO事故で再認識された低線量放射線による生物影響、再処理で必要となる超ウラン元素による内部被ばく、そして、原子力災害での緊急時被ばく医療等の防災対策に関する研究等です。

高経年化原子炉の増加に従い重要となる問題の一つに、応力腐食割れ（SCC; Stress Corrosion Cracking）があります。これは、原子力プラントの構造材が、SCCによりどう劣化するのを知り、そして、それを規制判断にどう使うかという事です。現在、ご存知のように、東京電力の17基の原子炉が全て止まっていますが、その原因は圧倒的に応力腐食割れであります。それからもう一つの重点は、確率論的安全評価(PSA; Probabilistic Safety Analysis)と呼ばれているものです。これは、確率論的な評価により、安全上懸念のある場所や弱点の特定及び現在の状態が災害となる事故からどの程度遠いのか等を科学的に評価し、さらに、これに基づいて意思決定をするための論理的な方法論であります。今後はこれによって、いろいろな判断をしていかなければならぬと考えますので、安全研究では、より一層重要性が増すと思われれます。最後は、これは日本で特徴的ですが、耐震の問題であります。実は、これは非常に難しい。地震に対する問題は、科学的（理学的）問題として、地震の発生や伝播に関するメカニズムの想定・評価があり、一方では、工学的な問題として、建造物の耐震設計やそのシステム設計があります。しかしながら、この2つの領域の問題は、なかなか簡単に結びつかず、経験に基づいて、工学的に対応しているのが現状です。今後は考えますと、科学的視点と工学的視点をより合理的に総合させる努力がより大切になるでしょう。現在、耐震安全の専門的分科会でも議論をしていますが、正直なところ、容易なことではないと実感しております。

SCC問題への総合的再挑戦、「再挑戦」に意味があります。私が安全委員会に参りまして3年になりますが、いろいろな事故・トラブルの報告を頂いております。幸いにも、従業員や

社会に放射線被曝を及ぼす事故は起こっておりませんが、原子炉が長期に止まるトラブルは次々にあるわけです。その殆どの原因は SCC と高サイクル疲労によるクラックの発生です。SCC と高サイクル疲労とは多少異なりますが、その原因に応力、材料、環境がある点では、共通的な所があると考えています。SCC に関しては、応力の評価、耐食性材料の開発・使用、その加工法、そして、その環境制御に、非常に大きな問題があります。そしてまた、SCC の起こり方やその伝播のしかたをきちんと把握した上で、対応しなくてはなりません。SCC 問題が最初に原子力分野で起こったのは、1960 年代です。日本では、最初の試験用発電炉 JPDR が原研で作られたのが昭和 38 年ですが、その最初の原子炉での最初の大きいトラブルは、圧力容器上蓋に小さな SCC が生じたことでした。当時、304 ステンレススチールでは、そういう腐食は起こらないと言われていましたので、304 ステンレススチールを使って原子力発電所を建設しようとしていた電力産業にとっては、非常に大きな問題となりました。その後、世界各地の原子炉で SCC が起こったので調べてみると、その溶接の仕方が悪いと、溶接の近くの所（熱影響部）でひび割れし易くなる鋭敏化が起こることが分かりました。その後の努力によって、304 ステンレススチールパイプの溶接に関する問題は、解決されたと思えるような成果が挙がり、さらに、304L、316A や 316L といった材料が開発され、使われるようになりました。しかしながら、最近次々と問題が起こり、これによって、従来の対応とは異なる、根本的に解決すべき問題がまだあるのではないかと指摘され始めております。これには総合的な対応、即ち、材料科学、構造工学、加工技術、それから、緩解技術、こんな言い方の技術があるか分かりませんが、応力を緩やかにする技術、そして、その環境を制御し、かつ、その SCC を検認・解析する技術を高める必要があると考えております。このような総合的対応により、今後、SCC に関する技術が確立されていくと思います。

右の写真は、原研から提供して頂いた最近の SCC の一例です。気を付けて頂きたいのですが、ひびの全長は 10 mm 足らずで、パイプの全部に伝わって貫通してはいません。表面での現象が金属格子を割って進むと思われれます。今、問題になっているのは、材料表面で起こる現象と内部で起っていく現象とは、同じではなく総合的な現象として起っているのではないかということで、それを今後評価する必要があります。先程、SCC の起こる原因として、応力が重要だと指摘しました。パイプ内面には高温・高圧の水が入っており、PWR では 150 気圧ほどで、BWR では 80 気圧ほどですが、実は、この材料の内部応力の方が遥かに大きいというのが問題であります。パイプ中の水圧が 15 MPa 程度であるのに、こちらの方は 300 MPa もの内部応力が残っています。したがって、内部応力の評価が非常に重要な問題であります。しかしながら、この内部残留応力は非破壊的測定がほとんど不可能とされております。中性子回折や X 線回折によって、最近、ようやく非破壊的に測れる可能性が示されるようになりました。いまだ、原子力発電所の中で使う技術にはなっていませんが、中性子を利用した、内部応力、特に、その空



間的方向における差を含めての内部応力の測定法について、原理的な研究もされており、これは、例えば、車のエンジンの内部応力測定にまで話が進んでいます。今後、こういう研究が中性子を使って進んで行くことを期待しております。

総合的・広域的な問題として、デジタル回路の信頼性が、以前から指摘されております。昨年、エレクトロンマイグレーションという現象により、制御系が不調を起こしたケースがありました。これは、チップの中のある部分だけに電流が良く流れ、チップの導電体を構成しているアルミ材の原子が電子によって動かされ、バブルができて導通しなくなる現象です。一種の断線が起こるのですが、この現象自体は1960年代に既に発見済みだそうです。チップが多用され、かつ、経年的に使用されるようになり、この現象が起こってきました。こういう事を、今後、総合的・広域的に検討しておく必要があると考えます。

もう一つは、PSA のより広い、精度の良い展開であります。施設の弱点の系統的評価、安全目標の設定、これはどの位リスクが低ければ安全と考えて良いかを PSA を用いて評価する技術です。さらに、稼働中の原子炉の状態がどの位大丈夫と考えられるかといったことを、PSA を進めることで、その評価が確実になると思います。この辺りはかなり総合的な領域の問題なので、大学の研究者も是非関心を持って頂きたいと思います。その他総合的な点として重要なのは、地震や低線量の放射線影響の問題、そして、最近非常に大きな問題となっております原子力技術と社会の接点について、大学が中心となって客観的な研究をして頂くと、世の中からの理解が進むと思います。

残り時間で、私の将来への夢を述べさせて頂きたいと思います。まさに、夢であり、突拍子も無いことかもしれませんが、京都大学には、元々、突拍子も無いことを言う人が沢山おられますので、大丈夫だと思います。安全確保の視点から望まれる究極的な核エネルギーシステムと言いますと、絶対安全であるかどうかがよく問われます。絶対安全というのは元々無理なのですが、少なくとも社会に災害を及ぼさない原子力エネルギーの利用システムは存在すると思われまます。安全目標の決定方法は議論の真っ最中ですが、原子炉を動かすことで、例えば、原子炉の壊れる確率が、一年間平均で100万分の1であるとか、1000万分の1であるとか、そういう数値を安全目標することが提案されつつあります。核分裂システムの場合、災害を及ぼす可能性のある原子炉事故の原因というのは、反応度事故と冷却材喪失事故であります。ここに、「PSA 評価で安全目標を軽々と凌駕するもの」と書きましたのは、こういう事故が原理的に起こらない原子力システムならば、これは、十分に達成できるわけです。その可能性として何があるかと言いますと、原子炉実験所で進めようとしている加速器駆動の未臨界体系がまさにそうであります。これですと、明らかに反応度事故は起こり得ないわけです。また、冷却材喪失事故が起こらないシステムは、液体燃料系で、かつ、再処理が直ぐにできる体系であれば可能です。したがって、双方の体系が組み合わさったようなシステムであれば、災害に至るような事故が原理的に起こらない核分裂システムが可能ですが、ただし、現段階の技術的観点から考えますと、これは非常に遠い将来のものではあります。しかし、このための基礎的な研究を大学でしっかり進めて頂ければ、将来この目標は達成できると思います。もう一つの究極的システムは核融合システムについてです。今の核融合研究では、D-T 反応を利用しているので、トリチウムの問題があり、中性子がエネルギーを持って行き、辺りを放射化してしまう問題もある。したがって、核融合で中性子が出ないような核融合があるそうなので、そういう反応を工

エネルギー源として使えば、この目標を達成できます。核融合を研究していた私の友人は、「そんなことは 100 年経っても、出来ないかもしれないよ」と言いますが、人間の知恵は、突然、ステップアップするものなので、意識を持って研究することが大切であると思います。

大学へのお願いです。社会が安全に対する価値を改めて要求し始めていると思います。安全というのは、結局、危険の少ない、安らかな、そういう状況・環境を確保することであり、結局は、自由に生きるための好適条件を維持するという、いわば、文明の前提条件であります。したがって、安全を確保することに、大きく積極的な意味を与え、いろんな活動の基礎に置かなくてはなりません。大学の研究活動といえども、それを重点に据えるものだと思います。もう一つのお願いは、安全問題には非常に総合的な側面が多くあり、精緻な専門性を基礎とした上での総合的なアプローチを、是非、大学の研究者の方々にお願いして、私の話を終わらせて頂きたいと思います。