原子力構造工学研究に関する海外の現状

第2回 SMiRT と第2回 PVT などの概要

安藤 良夫*

(1973年 12月12日 受理)

Present Status of Nuclear Structural Engineering Research Abroad

By Yoshio ANDO

A summary is given of topics appearing in papers and discussions presented at the 2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT) held in Berlin, at the Post-Conference Meeting on Computational Aspects of the Finite Element Method held in Stuttgart, and at the 2nd International Conference on Pressure Vessel Technology (PVT) held in San Antonio.

The review also covers a discussion meeting on containment design aimed at resistance against air craft crashes and explosions held at the Institut Reaktorsicherheit (IRS) and other pertinent information from several organizations.

KEYWORDS: nuclear structural engineering research, structural mechanics in reactor technology, Berlin, computational aspects of the finite element method, Stuttgart, pressure vessel technology, San Antonio, air craft crash, Institut Reaktorsicherheit

I. ま え が き

1973年9月から10月にかけての1ヵ月間に原子力構造工学に関係深い大規模な国際会議が2つ開催された。すなわち第2回国際原子力構造力学学会議 (2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 略称 SMiRT) と第2回国際圧力容器工学会議 (2nd International Conference on Pressure Vessel Technology, 略称 PVT) の2つである。SMiRT の後援団体には本学会も名を連ねていて、著者はその代表を仰せつかった関係もあり、また PVT の方も組織委員をしている上に、いずれの会議でもいくつかの論文発表を行なったので、両会議に参加した。後述のように、前者は欧州において、後者はアメリカで行われ、しかもその間2週間の間隔があったのでドイツ、ブラジル、メキシコの事情を調査した。

本稿は、いわば1ヵ月間の見聞録であるが、SMiRT は隔年、PVT は4年ぶりに開催され、しかも出席者

が1,000人前後という大会議であるから、原子力構造工学に関する問題の多くはここに集約されているとみてよく、あえて頭書の表題をつけた。

II. 第2回国際原子力構造力学学会議

第2回 SMiRT は第1回と同様ベルリンで行われ、その分野の分け方もほとんど同様である。主催者は前回以後に出来た SMiRT 国際協会と欧州共同体(EC) およびドイツ国立材料研究所 BAM であり、共催団体にはアメリカの Franklin Institute 研究所、ドイツ原子炉安全協会、イギリス Associated Nuclear Service など8団体、後援団体には日本、アメリカ、イギリス、ドイツ、スイスの各原子力学会、ASME など9団体が加わっている。今回出来た組織に国際科学委員会があり、いわば評議会的存在ともいうべきもので、42名の委員のうちには日本からの2名が含まれている。会議の会長は前回同様 Thomas A. Jaeger である。

* 東京大学工学部原子力工学科 (Dept. of Nucl. Eng., Faculty of Eng., Univ. of Tokyo)

9月9日(日)の午後開かれた組織委員会で次回以降の予定の概要が決り、第3回 SMiRT は1975年ロンドンにおいて、第4回は1977年秋アメリカにおいて行われることとなった。ロンドンの会議は Jaeger 中心は変わらないと思われるが、イギリスから組織委員会に Associated Nuclear Service, British Nuclear Energy Society が入っており、BNES 会長の Gott が両方に関係していることから、イギリス側は彼が地元世話役の中心になるものと想像される。次のアメリカの場合は、地元の世話役は ASME の代表で Northwestern 大学工学研究所長の Boley である。Jaeger は日本に都合のよいようサンフランシスコで開くよう注文をつけておいたと話していたが、アメリカ側の都合で必ずしもそうはいかない模様で、今のところアメリカ国内のどこかということだけが決まった。これらによって通称ベルリン会議といわれた SMiRT もより国際的に幅をもってきたことになる。

日曜の晩には会場のベルリン国際会議場で登録と顔合せパーティがあり、会議は9月10日朝、大講堂の開会式から始まった。ドイツ・オペラ・ベルリン所属の五重奏団の演奏があった後、Jaeger 会長の開会の辞、ベルリン市長の祝辞があり、再び演奏で終ったが、これは30分余りですみ、引きつづき EC の原子力政策の現状と将来、ドイツにおける原子炉の発展、核融合炉に予測される熱的機械的材料工学の問題という講演が行われた。

各分野の分け方は以下に列記するように第1回のときとはほぼ同様であり、前回の報告⁽¹⁾でやや詳しく述べたので、今回は名称程度の紹介にとどめる。

- A : 原子力の発展
- B : 原子力発電所の構造安全性および信頼性
- C : 核燃料および被覆の構造解析
- D : 燃料要素の構造解析
- E : 原子炉機器の衝撃および振動解析
- F : 炉心および冷却材循環系の構造解析
- G : 鋼製原子炉容器の構造解析
- H : プレストレスド・コンクリート原子炉圧力容器の構造解析
- J : 原子炉格納容器の荷重条件と構造解析
- K : 原子力プラント系の地震応答解析
- L : 熱伝達および熱応力解析：非弾性構造挙動
- M : 構造解析法、信頼性解析

これらのうちA, B はプレナリー・セッションであったが、他は8つのパラレル・セッションで4日間にわたり論文発表が続けられた。したがって、1人では

毎日出席しても A, B 以外は1/5しか出席できず、目標を定めてセッションを選択するので、日本として全容を把握するには原子力構造工学の各分野の人々が数多く出席する必要がある。論文は、後で *Nucl. Eng. Design* 誌等に掲載される招待講演の予稿はないので、総数の約70%ぐらいが厚さにして合計 30cm ほどのプレプリント集の形で配布された。第1回の SMiRT 論文のうち主として G, L, M については動燃の委託で日本溶接協会原子力研究委員会 SPN 小委員会で勉強会を行い、報告書にとりまとめたが、詳細な把握への第1手段としてきわめて有効であった⁽²⁾。

第1, 2回の SMiRT の一般セッションで発表された全論文数と日本の論文数をプログラムから数えて表に示すと第1表のとおりである。当日取消しなどがあるため多少の誤差はあるが、一般に第1回より日本の論文の増加が目立っており、最初のときは遠慮して1人1論文しか出さなかったところ、外人は1人で多数出していることがわかり、第2回で増加したこともある。K の振動、耐震は論文が多い方であるが、日本が得意としている分野であることが論文数に明らかに出ています。L の熱に関係した構造解析、M の手法と信頼性は論文数の増加が目立ち、日本の論文も急速に増え、この分野に重点がおかれつつある傾向がうかがえる。G の鋼製圧力容器は日本からは意外と論文が少なく、むしろ F の配管関係の関心が深まっているようだ。応力解析のように材料とあまり関係のないものは G で扱われないためもあるので一概にはいえない面もある。C, D の燃料関係の構造解析は重要なことは了解するが、燃料そのものの知識に乏しい者に協力を求め

第1表 SMiRT 会議発表論文数

分 類†	第1回会議(1971) 全 論 文 数(日本)	第2回会議(1973) 全 論 文 数(日本)
C	26 (0)	20 (1)
D	24 (1)	35 (2)
E	29 (1)	27 (2)
F	33 (1)	36 (6)
G	39 (1)	48 (1)
H	42 (1)	42 (3)
J	28 (2)	27 (0)
K	53 (9)	55 (7)
L	44 (2)	59 (9)
M	43 (2)	60 (5)
合 計	361 (20)	409 (36)

† A, B (プレナリー・セッション)を除く

ても限度があり、燃料専門家の中から構造の専門家が出席する必要があるのではないかと感じた。

第2回 SMiRT 会議の著者ならびに出席者はリストによると1,216名の多きを数え、著者は必ずしも出席していない者もあるが、夫人や事務局なども入れると約1,000人の出席という大会議である。上記リストのうち最大の人数は地元ドイツの385人であるが、これは別として日英米3国の著者、出席者を所属別に分類すると第2表のようになる。日本は大学関係、会社関係の比率はかなり良い線であるのに、研究、開発、中立機関の比率が低く、実際の出席者は著者の知るかぎりでは本国からの出張者はなく、欧州に留学中の1人が論文代読を行なった程度であった。これは大学関係者がそれぞれ出席のために旅費捻出等苦勞があると想像されるにもかかわらず、東京大学の7名をはじめ、原子力工学科の存在しないいくつかの大学からはるばる出席して論文発表を行なったことに比べると、日本の原子力研究開発機関が原子力構造工学に関心の薄いことを物語っている。高度の構造工学を必要とする原子炉を自ら開発するには、大いに世界の第1線に出て同じ分野の人々と接触して知識情報を収集し、将来の接触のための道をつけ、また自らの研究成果を世に問うという姿勢が必要ではあるまいか。

第2表 第2回 SMiRT 会議著者・参加者数

	日 本	イギリス	アメリカ
大 学	24(26)	19(16)	81(32)
研究、開発、中立機関	13(14)	31(26)	56(22)
電力会社	7(7)	17(15)	12(5)
製造会社等	50(53)	48(41)	102(40)
その他	—	2(2)	3(1)
合 計	94(100)	117(100)	254(100)

なお、今回は一般公開のセッションのほか高速炉の primary containment と題する招待パネリスト25名による討論会が非公開で行われ、日本からは著者だけが指名されて出席した。主としてエクスカーション時の閉じ込めの問題が論ぜられた。著者は高速炉の配管系の彎曲管や分岐管では内圧がないために1次膜応力がほとんどなく、板の曲げ応力が支配的となり、荷重とくに1方向への繰返し荷重によって内部欠陥から亀裂が発生して進展するような場合は板の内面の引張応力領域で長く成長し、板の表面には至らず、限界亀裂長さに達したとき急に大きく割れることを実験でも観察していることを紹介した。この場合“leak before fracture”すなわち破壊する前に小漏洩があるから発

見できるという考えは成り立たない場合もあり、高速炉1次系では供用期間中検査が重要であることを述べた。一般に圧力容器は圧力が低いほど何となく楽な設計になりそうであるが、圧力がゼロに近いことがかえって問題であるわけである。これに対してはかなり反響があり当日も質問を受けたが、翌日廊下でつかまり昨日の話をもう一度ここで聞かせてくれなどという者もあったほどである。

5日間の熱心な研究発表が終ったあと、閉会式は9月14日夕刻行われ、イギリス原子力学会会長 Gott が「成功した原子力発電所——構造解析者の役割」という講演を行なって締めくくった。

翌日外国人だけのポツダム・ツアーに参加した。東ドイツ側にある Sunssouci と Cecilienhof への日帰りバス旅行で親睦を主にしたものであるが、広島、長崎への原爆投下がこの部屋から発令されたとか、ポツダム宣言がここで起草されたとか説明されると、終戦前後の緊張が再び想起された。

Ⅲ. 有限要素法の計算法に関する会議

ベルリン会議のあとをうけて9月17,18の両日、同じ西ドイツ国内のストットガルトにおいて有限要素法の計算法に関する会議 (Post-Conference Meeting on Computational Aspects of the Finite Element Method) が開かれた。これは前回のベルリン会議の際も Post-Conference として同場所において開かれたためストットガルト会議として知られている。著者は別の用件があり、これには参加しなかったが、著者の講座の矢川元基助教授が参加し、情報を提供してくれたので、その一端を報告する。

本会議はストットガルト工科大学 (Technische Universität Stuttgart) の付属機関である Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrt-konstruktionen (ISD) の主催として行われた。この研究所は Argyris を中心とした有限要素法研究に関する1派の存在によって世界的に有名である。会議はまず Argyris 教授の Opening Address から始まり、17日に11論文、18日に12論文が発表された。論文内容は会議の目的が

- (1) 有限要素法ソフトウェアの保全と検証
- (2) 有限要素法解析のハードウェアとソフトウェアに関する必要事項
- (3) データ処理、問題の記述ならびに結果の評価
- (4) 計算法

に関するものと指定されたため、大別すると

- (a) 複雑な構造物(ノズル-シェル結合部)に対するデータ処理
- (b) 各国で開発されたプログラムシステムの解説(現状と将来)
- (c) 新しい計算アルゴリズム

のようなものであった。なお、会議出席者は約120名であり日本からは若手を中心に16名であった。

Ⅳ. ドイツ原子力安全協会等の訪問

9月18日ケルンの IRS (Institut für Reaktor Sicherheit) を訪問した。日本から手紙で訪問を通告しており、またベルリンで Kellermann 会長にも調査要件を通告してあったので、同会長以下専門家と充分討議することができた。日本側からはたまたま著者と同一行動中の東大鶴戸口教授にも参加願った。

調査要件は、原子力施設に影響する恐れのある外部からの衝撃荷重に対してドイツがどのような理念を持ち、また対処しているかを調べることである。

ドイツで検討のために採り上げられた外部からの衝撃力は、航空機の衝突、化学工場等の爆発、ゲリラの仕掛けた爆弾の3種類である。日本で重視しているタービン・ミサイルに対し、ドイツでは原子炉が1基ずつ設置され、格納容器に関してタービン軸が半径方向に向いているため通常の安全配慮がなされている程度である。

ドイツは前記3種の衝撃力のうち、航空機に関しては、1973年9月10日以降に建造される原子炉格納容器はすべて所定の設計荷重曲線に耐えるように建造されなければならないという通達が内務大臣 Gensher より出された。本稿ではこれについてあまり詳細に述べる余裕はないが、70 msec の間に最大11,000 t が加わるとしており、仮想墜落機種としてはファントム戦闘機が選ばれ、この設計荷重曲線が作られている。格納容器外部遮蔽の鉄筋コンクリートへの突入厚さは1.2 m ぐらいになるとのことで、燃料油が中へ入らないよう鋼製ライナーまたは鉄筋網が必要な場合もあり、工事費はかなり増加する。

化学工場の爆発の問題は、化学工業会社 BASF が原子炉を持つことを計画したり、BAYER が原子炉の近くに化学工場を建設しようとしたことから検討され、炭化水素の爆風が0.3 bar の反射波と考えてもよい距離、すなわち約800~1,200 m だけ想定爆発源と原子炉を引き離し、原子力施設の方もその程度に耐えるよう設計するというのが骨子であるが、どちらも検討だけに終わったようである。

ゲリラの場合は、1人がトランク程度の爆弾を原子力施設のどの個所に仕掛けて爆破しても、少なくとも炉を停止して余熱除去ができるようにしておかなければならないという検討を行なったそうであるが、頭の中で考えたことを討論した程度で、具体的な方策を立てるには至っていないようである。

翌19日、ケルン近郊にあり prestressed cast iron の圧力容器のモデルを開発した Siempelkamp を訪問した。コンクリートの代わりに鉄鉄を使おうということでもかなりの大きさの模型を作って耐圧試験などを行なったものである。実用となるとまだ見当もつかないが、珍しいものを見せて貰って意見を交わすことができたのは収穫であった。なお、この会社は風鉄、ダクタイル鉄などもっぱら鉄鉄製品だけを作っており、原子力船オットー・ハーンの遮蔽体を納めたそうであるが、ちょうど高温ガス炉用の熱遮蔽体が工場に並べられてあった。

Ⅴ. ブラジルとメキシコの状況

このあとニューヨークを経て、ブラジル、メキシコへ行き、原子力構造工学ならびに安全研究等の調査を行なった。

ブラジルではリオデジャネイロの ISHIBRAS、サンパウロの AEI (Atomic Energy Institute), IPT (Instituto de Pesquisas Technologicas) を訪問した。

AEI は出来て間もなくまだ工事中のところが多く、所長の Pieroni は数名に面接したし、東大の竹内助手の元気な姿も見たが、構造に関しては U.K.AEA を停年退職した土木関係の Davidson が PCPV の指導をしているのがほとんど唯一の研究室で、機械工学的な構造研究はまったく手をつけていなかった。高温ガス高速炉を開発したい意向があるようであるが、多くの分野の総合で開発が成り立つことを考えると、道は遠いように思える。原子炉安全に関しては何も研究をしておらず、ブラジルで原子炉を設置する場合は、炉を製造した国の安全審査に合格したものならばそれでよいとのことであった。IPT は国立工業研究所ともいべきもので、AEI のすぐそばにあり原子力と関係あるものは前にウランの遠心分離に手をつけたことがあるが、今は止めている由である。構造に関しては、土木が主でダムの模型による実験的応力解析、有限要素法による解析などを行なっていて、日本人の若い研究者にも会えたが、AEI のように予算が多くないのでと不満をもらしていた。両研究所の協力はあま

りないそうである。

メキシコでは中央電力庁を訪問した。国内の電力設備は現在約 7,000 MWe で、4,200 MWe が建設中である。原子力は 675 MWe の BWR が 1977 年末と 78 年末に運開の予定である。火力水力も含めて、ボイラ、タービン、水車など部分的ではあるが 5,400 MWe 分の大型機器、180 万台の積算電力計を日本から輸入しているそうで日本の影響力の大きいのに驚いた。

国立原子力研究所 (Instituto Nacional de Energia Nuclear) は、メキシコ市内各所に分散されていたものが 1971 年新しくメキシコ原子力センターとして統合集中された由である。現在約 500 人の所員、うち 175 人が理学工学に関する大学卒であり、工学を細分すると原子力工学、化学工学、電子工学、機械工学などの分野にわたっており、国内国外で修士または博士をとった者も多数とのことであり、発展途上国としての努力を行なっている。原子炉を自主開発するにはほど遠いようで、構造工学には手が及んでいない。

Ⅵ. 第 2 回国際圧力容器工学会議

国際圧力容器工学会議 (International Conference on Pressure Vessel Technology) は、第 1 回が 1969 年オランダのデルフトで開かれ、今回の第 2 回はアメリカテキサス州サンアントニオにおいて 10 月 1 日から 4 日まで開催された。この会議は、創設は 1966 年にチェコスロバキアのピルゼンで行われた IAEA の原子炉圧力容器の検査に関するパネルに出席したアメリカの Wylie、オランダの Latzko、日本の著者らが相談したことから実現したという神代時代の経緯があり、原子力に限った会議ではないが、原子力機器配管に関する論文が多く取り扱われている。

会議は、前日の 9 月 30 日ヒルトンホテルにおける登録と顔合せパーティから始まった。会議の主催は ASME (アメリカ機械学会) であり、日本の圧力容器関係の多くの基準が ASME コードに準拠している事実もあって、日本からの出席者は約 30 名程度あった。発表によると全登録者数は 557 名とのことであるから、約 5% ということになる。

開会式は 10 月 1 日 10 時から、アラモの砦にほど近いサンアントニオ、コンベンション・センターの芸術劇場で開催され、会長の Young の開会の辞のあと、SwRI (South-west Research Institute) Goland 所長の Wylie 追悼演説があり、Wylie 夫人も最前列に腰掛けて聴いていた。Wylie は SwRI 副所長の 1 人で、この PVT 会議創設に最も貢献した人物であり、

今回の議長を予定されていたが、1972 年 10 月スウェーデンにおいて航空機事故の犠牲となったのである。

続いてプレナリー・セッションとして 5 人の招待講演が行われた。話の主題は詳細に述べないが、いずれも圧力容器に関するもので、機械的性質と欠陥について Nichols (U.K.AEA)、鋼材について Gross (US スチール)、製造について安藤 (東大・原子力)、高圧設計について Latzko (デルフト工大・原子力)、高温設計について Bermann (Foster Wheeler Corp.) がそれぞれ約 20 分講演した。アメリカ 2 名、欧州 2 名、日本 1 名という配分で、原子力関係者が 3 名と過半数を占めている。著者は多くの適任者の中から第 1 回に続いて指名される光栄に浴したが、これは前述のように神代から関係していたためと思われる。講演中の状況を写真 1 に掲げる。

写真 第 2 回 PVT 会議開会式で講演中の著者

1 日の午後から 4 日の午前にわたり、パネルと論文発表が 4 つのバラレル・セッションで行われた。とくに 2 日には夕刻 7 時 30 分からのセッションが行われ、9 時過ぎまで熱心に会議が続けられた。

今回の特長の 1 つは各国のパネリストによる次の 4 つのパネルが行われたことである。

- (a) 圧力容器に関する各国の研究
- (b) ASME コード Sec. III (原子力機器)
- (c) ASME コード Sec. II (原子炉 1 次系の
供用期間中検査)
- (d) 高圧力工学の応用

パネリストはあらかじめ指名され、発表内容も希望がついていたが、著者は (a) に指名されたので、日本の破壊力学と高温構造に関する研究を紹介した。パネルの座長の Larson が各国の発表をこれから出る Proceeding 第 3 巻にとりまとめるはずであるが、日本のはそれだけでまとまった形にしていたため、Welding Research Council を通じ、全文を印刷してくれ

ることとなった。ASME コードに関する2つのパネルはそれを作った委員会のメンバーがパネリストの大半を占め、アメリカ人以外もごく少数加わっていたが、日本人は入っていなかった。コードの疑問点を文書で申し出た後、パネリストが分担して答える形をとって行われ興味があった。もしこれも後刻印刷されれば有益な資料となるであろう。

一般のセッションは、あらかじめ応募し採用された約100論文が平行して発表された。日本からの論文は12論文であったから出席者数の比率より多い。一般論文発表のセッション数は23であり、おのおの4～5編程度の発表が行われた。これらのセッションを著者なりに分類すると次のようになる。

1. 応力ひずみ解析
 シェル解析、弾性解析1および2、
 塑性解析等、クリープ解析
2. 設 計
 設計と安全性、配管1および2、
 クロージャーとシール
3. 疲 勞
 疲労1および2、低サイクル疲労
4. 破 壊
 亀裂の発生と伝播、破壊力学の応用、
 破壊破損の解析
5. 材 料
 圧力容器および配管用材料、焼入れ
 焼戻し高張力鋼
6. 施 工
 溶接、新方法と残留応力
7. 検 査
 試験および方法、アクースティック・
 エミッション
8. 特殊容器
 PS コンクリート容器、フィラメント
 およびワイヤ・ワウンド容器

各発表者は発表当日の朝、座長と一緒に朝食会に出席し、諸連絡を受けるシステムをとっていた。一般に1セッション2人の座長が任命され、日本人座長は4名であった。

10月1日の夜、組織委員会が招集され、日本からは東大鶴戸口教授と著者が出席した。かねてから打診を受けていたところではあったが、結局次の第3回PVT会議を1977年4～5月ごろ東京において開催することが決まった。おそらく日本側の組織委員会と

ASMEの共催という形を取り、出版関係をASMEに分担して貰い、会議開催運営を日本側が受け持つという形になろう。

2日の昼には会議場内の1室において公式昼食会があり、著者らは組織委員ということで難段に座らされた。第3回会議が日本で行われることが披露された後ANSI (American National Standards Institute) 会長 Trowbridge の“増大する国際標準化の重要性”と題する講演が行われた。

そのほかの公式行事としては、3日の晩にメキシコ風の Fiesta パーティ、4日の昼の昼食会を兼ねた閉会式があった。

日本からの出席者の希望が多かったので10月3日朝SwRIを見学した。Goland 所長みずからSwRIの概況を説明され、原子力に関係深い研究室を中心に見学を行なった。U.S.AECの軽水炉の安全研究としてORNLを中心に年間数億円の予算を使って行っているHSST (Heavy Section Steel Technology) 計画の一環である超厚板の破壊力学に関する実験研究、日本のBWRの大部分に採用されている供用期間中検査機器などを見学した後、帰りにMemorial ParkのWylieの墓に詣でて冥福を祈った。

Ⅶ. あとがき

1ヵ月間の間に移動した距離としてはおそらく著者にとっては今回が最長で、日本から北極、欧州、大西洋アメリカ、ブラジル、メキシコ、再びアメリカ、太平洋を経て帰国というコースであった。会議としては著者の専門にとってきわめて重要なSMiRTとPVTがあり、両者とも論文発表のほか組織委員としての仕事もあったが好調に事が運んだので幸いであった。その間の事情を紹介して本稿をまとめたが、ごく概況の報告の形となった。今後各論文を吸収消化してより学術的に趨勢を把握することが大切で、より多くの人々の協力を得て取りまとめたいたいと考えている。

終りに論文作成に当って資料提供、整理などにご協力を頂いた方々、現地でお世話になった方々に謝意を表する。

— 参 考 文 献 —

- (1) 安藤良夫：本誌，14(2)，29 (1972)。
- (2) 日本溶接協会 SPN 小委員会：高速炉の構造解析ならびに構造設計に関する調査報告書，(1973)。
- (3) SCHILLING, F.E., BEINE, B.: *Nucl. Eng. Design*, 25 [2], 315 (1973)。