

<論文掲載にあたって>

私は「玄海原子力発電所3号機、4号機再稼働差止仮処分命令申立事件の決定」が出る前から意見を述べてきましたが、これまでの原発運転差止め裁判は、原発内部の事は避けて、原発外部の事に重点を置いてきたと思われまます。

しかし、最近の裁判所は、

「そして、上記事情の疎明については、債務者（注：九電）において、まず、原子力規制委員会の上記判断に不合理な点がないこと、すなわち、①同委員会における調査審議に用いられた具体的審査基準の合理性並びに②当該基準の適合性に係る調査審議及び判断の過程等における看過し難い過誤や欠落の不存在を相当の根拠、資料に基づき疎明する必要があり、債務者が上記の疎明を尽くさない場合には、同委員会がした判断に不合理な点があるものとして、債権者（注：申立人）らに上記の具体的な危険があることが事実上推認されるものというべきである。」

「他方で、債務者が上記の疎明を尽くした場合には、本来的に疎明の責任を負う債権者らにおいて、本件各原子炉施設の安全性に欠けるところがあり、本件各原子炉施設の運転に起因する放射線被ばくにより、債権者らの生命、身体に直接的かつ重大な被害が生ずる具体的な危険があることについて疎明しなければならないと解するのが相当である。」

（2017年6月13日 玄海原発3・4号機再稼働差止仮処分申立「却下」の判決骨子より）

とあるように、裁判所は「本来的に疎明の責任を負う債権者らにおいて」「債権者らの生命、身体に直接的かつ重大な被害が生ずる具体的な危険があることについて疎明しなければならない」との見解を鮮明にしてくれているように思われますが、原発再稼働に反対する側には、原発内部の問題があまり良く分かっていない様に思われます。

これらの問題を解決する為に、今海外の論文や報告書を調べて、少しでも材料を増やそうと考えています。今回の報告も、そのためのものと考えています。

下記の報告文は、2017年6月17日の福岡核問題研究会6月例会において報告したものです。

福島第一原発の過酷事故を起こした原発が東京電力の沸騰水型原発だったので、原子力規制委員会も、沸騰水型原発には厳しい対応を行ってきました。しかし、加圧水型原発は、過酷事故を起こした原発とは基本設計や構造が大きく違うという事を理由にして、加圧水型原発には非常に甘い対応がなされました。このため、加圧水型原発を使用している九州電力・関西電力・四国電力・北海道電力は、過酷事故対策をまともには行いませんでした。

このことは、日本の新規制基準と、 I A E A（国際原子力機関）の安全基準を比較するとある程度の事は分かるのですが、 I A E Aの安全基準は世界各国の国内安全基準とある程度整合性を取るような事が行なわれているので、過酷事故対策の問題を極めて明瞭には表示してはいないようです。

それに対して、OECD(経済協力開発機構)の SERENA-Project の報告書やそれらに関する論文の方が過酷事故対策を明快に説明しているように感じられたので、その調査を行ってきました。今回は、その調査したことを「TROI の 2007 年論文と SERENA-Project2 報告」にまとめましたので報告します。

【資料】に SERENA-Project2 の 3 通の論文翻訳を載せています。参考にして下さい。

.....

TROI の 2007 年論文と SERENA-Project2 報告

2017 年 6 月 17 日

中西正之

1. はじめに

平成29（2017）年05月18日の第468回柏崎刈羽原発の適合性審査会の配布資料「資料1 柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉 重大事故に関する変更について」で東京電力は、『4. 仮に水位が上昇した場合（7m）に水蒸気爆発が起きたと仮定した場合の感度解析（参考解析）として、水蒸気爆発解析コードJASMINE、構造応答解析コードAUTODYN-2Dにより圧力伝播挙動等を求めた結果、原子炉圧力容器の指示に支障が生じるものでないこと』と説明しているように、東京電力は、メルtdownが発生した場合、水蒸気爆発は起こり得るとし、その場合の原子炉格納容器内の強度計算を行っています。

しかし、九州電力はメルtdownが発生しても絶対に水蒸気爆発は起こらないとしているので、万一水蒸気爆発が起きた場合の原子炉格納容器内の強度計算は行っていないと、原子力規制委員会もその事を認めています。

このことは、大問題と思われ、これらの検討を少しでも分かりやすくするために、OECD の SERENA-Project1 の重要な論文である TROI の 2007 年論文と SERENA-Project2 の 3 通の論文の調査を行いました。

2. TROI の 2007 年論文について

TROI の実験は、韓国の原子力研究所で継続的に行われているが、この実験は OECD（経済協力開発機構）の SERENA Project 1 の主要な実験の 1 つで有り、他にフランスで行われた KROTOS の実験と連帯して行われてきました。2007 年からは SERENA2 のプロジェクトへと延長されています。TROI の論文は 2002 年と 2003 年の論文がインターネットに公開されてい

ますが、2007年論文は公開されていないようです。[注1]

TROIの実験と、KROTOSの実験結果をもとにして、日本を始め世界各国で、水蒸気爆発シミュレーションプログラムが開発されています。

したがって、原発の格納容器内で水蒸気爆発が起きた場合、格納容器がその爆発に耐えきれぬかどうかの強度計算は多くのものが、TROIの実験とKROTOSの実験をもとに行われているので、TROIの実験とKROTOSの実験は重要な実験と思われます。

TROIの2007年論文で新しく報告された実験は、これまでの実験よりも融点の高い(80w%UO₂ + 20w%ZrO₂)の疑似デブリを取り扱った事と、実験にトリガーを使用した事です。

実験は、TROI-34、TROI-35、TROI-36、TROI-37が報告されています。

TROI-37は(80w%UO₂ + 19w%ZrO₂+1w%Zr)の疑似デブリを使用しています。

この論文では、

『TROI実験の重要な発見は、自発的な蒸気爆発の発生がコリウム層の組成に関連していることであった。70:30wt% (UO₂:ZrO₂)の共晶質コリウム層と純粋なジルコニアは、自発的な蒸気爆発であったが、他の組成のコリウムはそうではなかった。

しかし、重大事故時には外部トリガーが可能であるため、外部トリガーをかけて蒸気爆発試験を行う必要があります。』

と説明されており、実炉の重大事故時には外部トリガーはありうるので、外部トリガーを使用した試験を行ったと説明されています。

トリガーを与えた試験では、(70w%UO₂ + 30w%ZrO₂)の疑似デブリの実験よりも、(80w%UO₂ + 20w%ZrO₂)の疑似デブリを使用して実験の方が水蒸気爆発の発生圧力は小さくなっています。

この報告では、どうしてUO₂の含有量が10%増えて、ZrO₂の含有量が10%減ると水蒸気爆発が起こりにくくなるのかの解析は行われていない様に思われます。また、UO₂とZrO₂の二成分系状態図による考察も行われていないようです。

この実験では、やはり試験温度の推定に疑問を持って、実験中に融点が3422°Cのタングステン棒を溶融デブリに差し込んで、タングステン棒の温度を2色温度計で測定しているが、この方法では温度測定はうまくできなかったようです。

また、『温度測定はまた、高温計と溶融物との間に取り付けられた覗き窓の影響を受ける。したがって、パイロメータは実験後に校正された。

高温計がガラス窓のために実際の温度よりはるかに高い温度を示したことが示された。

ガラスの分光透過率は波長に大きく依存し、2色の高温計が歪んだ。窓ガラスを通した測定温度(T_m)は、1500~2700°Cの範囲で校正した。』と説明されています。筆者は2色の高温計は使用した経験が無いが、輻射高温計の使用経験では、のぞき窓のガラスの種類によって、測定温度に大きな誤差が出るから、試験前に使用ガラスの必要な補正量を検定しておかないと、正確な温度の測定はできないと思われます。

それから、製錬時の溶融金属や原発のデブリが水蒸気爆発を起こすのは、溶融金属やデブリがそれらの融点よりもある程度高い温度まで加熱されており、水中に落下した時水中で直ちには固化せずに粒子化し、廻りを水蒸気膜で包まれて、内部で液状の状態を維持して

いる時と思われます。

したがって、模擬デブリの正確な温度推定は極めて重要であります。

TROI-34 の溶解温度は (70w%UO₂ + 30w%ZrO₂+1w%Zr) の疑似デブリ測定温度が 3670K (3397°C)、補正温度が 3343K (3070°C) とされているのに、試験後の水冷るつぼ内は未溶解の疑似デブリが大量に残っており、模擬デブリが十分な温度まで加熱されているのかどうか疑問が残ります。

これらの問題は、SERENA-Project2 ではかなり改善されているようです。

3. OECD- SERENA-Project2 について

(1) 「OECD-SERENA-Projectにおける原子炉压力容器外水蒸気爆発リスクの解決の現状」の論文

OECD- SERENA-Project2の関係の論文は沢山ありますから、「OECD-SERENA Projectにおける原子炉压力容器外水蒸気爆発リスクの解決の現状」[注2]の論文を紹介します。

この論文は韓国とフランスとスロベニアの3人の著者の共同論文になっています。

OECD-SERENA Project2の概略が説明されています。

OECD-SERENA Project1におけるTROI実験は、まだ独立した実験の部分が多かったようですが、OECD-SERENA Project2では、TROI実験とKROTOS実験との比較が行われ、両方の実験条件を合わせて、それぞれ6回の実験が行われています。もともと、KROTOS実験は模擬物質が少量の実験ではあったが、フランスで行われており、ヨーロッパ連合体の高度の実験レベルで行われていたようです。TROI実験は韓国で行われ、旧ソ連の科学アカデミーの研究所のデブリ高温溶解技術を導入した事から始まっているようです。[注3]

初めは手探りのような状態だったと思われますが、OECD-SERENA Project2で行われた実験では、KROTOS実験のような高度のレベルの実験に発展したようです。

KROTOS実験とTROI実験の試験施設の説明が行われています。それぞれ6回の実験の実験条件の説明が行われています。

OECD-SERENA Project1により、水蒸気爆発実験より水蒸気爆発シミュレーションプログラムが各国で多数開発されたので、それらのシミュレーションプログラムによる実験結果予測から、重要と考えられる試験条件が検討され、その試験条件が採用され、それぞれ6回の実験が、共通仕様で行われたことも、水蒸気爆発実験の信頼性を高めるうえで、大きな力となったようです。

この報告は、OECD-SERENA Project2の概略の説明なので、全体を見渡すのには良い報告と思われませんが、詳細な報告の調査が必要と思われます。

(2) NKS の「MC3D による蒸気爆発の分析」論文

Nordic nuclear safety research NKS (北欧原子力安全研究) の「Analysing Steam Explosions with MC3D」の論文は、フィンランドのVTT技術研究センターのマグナス・ストランドバーグによって発表されています。[注4]

この論文はOECD-SERENA Project2のKROTOS実験とTROI実験の説明が行われています。

実験装置の詳しい図面も掲載されています。

KROTOS実験装置は、X線透視検査装置を設置しており、強固な鋼鉄製の水槽の中で水蒸気爆発が起きている状態を精密に記録できるので、水蒸気爆発が起きている時の状態を詳しく観察できたそうです。

それらの実験を基にして、フランスのIRSNとCEAによって開発されたMC3D (Multi Component 3D) シミュレーションプログラムの説明が行われています。

『3.1 MC3Dの一般的な説明

MC3Dは、一般的な数値ソルバーを持つ2つの異なるFCI (燃料冷却剤相互作用) コードを使用します。

コードの1つは予混合段階用で、もう1つは爆発段階用です。

トリガー段階は、爆発段階で使用されるコードに組み込まれています。これにより、シミュレーションが2つの部分に分割されます。

最初の部分では、メルトジェットの断片化、蒸気の蓄積および熱伝達がシミュレートされる。第2の部分は、ユーザが選択した時点で開始することができ、熔融液滴の急速な断片化および熔融液滴から冷却液への熱伝達を処理する。』

OECD-SERENA Project2の段階では、KROTOS実験とTROI実験の測定値とシミュレーションプログラムによる計算数値の比較が行われるようになり、これらの結果より、原子炉格納容器内に水を貯めた場合の、数値計算がかなり行われ始めたようです。

そして、実験精度もかなり向上してきたようです。

海外のOECD-SERENA Project2関係の論文では、実際の原子炉にメルトダウンが起きた時には、外部トリガーが無い場合も有るが、外部トリガーのある確率が大きく、又外部トリガーが働くタイミングは変動すると思われ、タイミングによって水蒸気爆発力が大きく変動すると推測されています。

そして、原子炉の安全性の確認は、最大の水蒸気爆発の起きる時に外部トリガーが働いても、格納容器が破壊されない対策が必要と考えられているようです。

この考えは、東京電力の考えとは良く似ているようですが、加圧水型原発を所有する電力会社や原子力規制委員会の考え方ときは全く違うようです。

日本でも、OECD-SERENA Projectで水蒸気爆発のシミュレーションプログラムの開発に参入しているようです。

ただ、日本の論文は原子力村に取り込まれており、都合の悪い結果は秘密にされているようですが、海外の論文ではそのような事は少ないようです。

(3) スロベニアの研究者がMC3Dプログラムで加圧水型原発の圧力計算を発表

スロベニアには原子炉1基が稼働しているそうですが、スロベニアにも原子力研究所があり、OECD-SERENA Projectで開発されたMC3Dプログラムで加圧水型原発の圧力計算を発表しています。

Ex-vessel Steam Explosion Analysis for Pressurized Water Reactor and Boiling Water Reactor [注5]

この論文では、加圧水型原発では、80wt%UO₂、20wt%ZrO₂と沸騰水型では70wt%UO₂、30wt%ZrO₂について、MC3Dプログラムを使用してシミュレーションを行い、その結果を掲載しています。MC3Dプログラムには、グローバルモデルとローカルモデルが有り、両方のモデルで計算しています。

シミュレーション条件は、さまざまに変化させ、その中でキャビティ内での水蒸気爆発圧力の大きい条件を探して、発表しています。

シミュレーション結果は、加圧水型原発と沸騰水型原発の両方について報告されています。しかし、日本国内では、沸騰水型原発を所有する電力会社は、メルトダウンの発生時には水蒸気爆発は起こると考えて、水蒸気爆発が起きても格納容器が損傷しないような様々な対策を行っているので、加圧水型原発の場合のみを報告します。

この報告では、加圧水型原発にメルトダウンが起きた時、キャビティを満水にしておく、水蒸気爆発が起きた場合には、キャビティ側壁には約1.5 MPa（1.50気圧）の爆発圧力がかかる可能性があると報告されています。

加圧水型原発のキャビティ側壁には約1.5 MPa（1.50気圧）の爆発圧力がかかった時、格納容器が損傷する事が有るのかないのかの検討が必要に思われます。

今後、海外にはこれ以外に論文が無いのかどうか調べていきたいと思えます。

◆参考文献

[注1] JH. KIM et al. :RESULTS OF THE TRIGGERED STEAM EXPLOSIONS FROM THE TROI EXPERIMENT, NUCLEAR TECHNOLOGY VOL. 158 JUNE 2007

[注2] Seong-Wan HONG¹, Pasca Piluso and Matjaz Leskovic: Status of the OECD-SERENA Project for the Resolution of Ex-vessel Steam Explosion Risks

<http://bit.ly/2qEZAoS>

[注3] Jin Ho Song et al. : Spontaneous Steam Explosions Observed In The Fuel Coolant Interaction Experiments Using Reactor Material, Journal of the Korean Nuclear Society Volume 33, Number 4, pp.344-357, August, 2002

<https://www.kns.org/jknsfile/v34/A04803285962.pdf>

[注4] Magnus Strandberg: Analysing Steam Explosions withMC3D, NKS-344 ISBN 978-87-7893-426-0, July 2015

<http://bit.ly/2qWYC7T>

[注5] Mitja Uršič et al. : Ex-vessel Steam Explosion Analysis for Pressurized Water Reactor and Boiling Water Reactor

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315002120>