

TR0I 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、原子炉压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、メルトダウンが発生した場合、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、九州電力はメルトダウン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く、原子力規制委員会は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TR0Iの2007年論文とSERENA-Project2の3通の論文の調査を行いました。

2. TR0I の 2007 年論文について

TR0I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。TR0I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]

TR0I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、TR0Iの実験とKROTOSの実験をもとにして行われているので、TR0Iの実験とKROTOSの実験は重要な実験と思われまます。

TR0I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、TR0I-34、TR0I-35、TR0I-36、TR0I-37が報告されています。

TR0I-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、『TR0I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における原子炉圧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における原子炉圧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せんが、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

(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、外部トリガーある確率が大きく、又外部トリガー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有り、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

と、水蒸気爆発が起きた場合には、キャビティ側壁には約15 MPa（150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15 MPa（150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 Leskovar: 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>