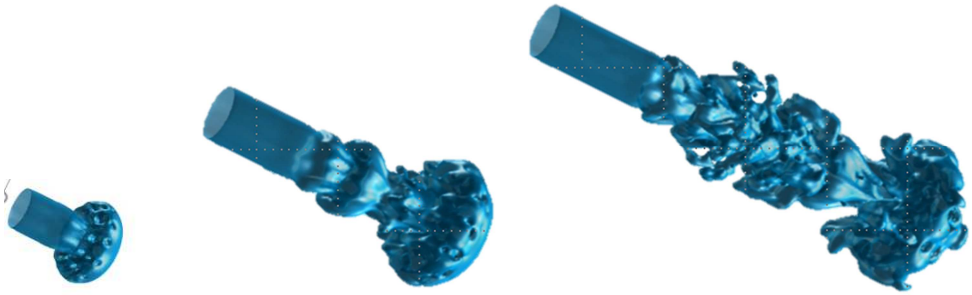
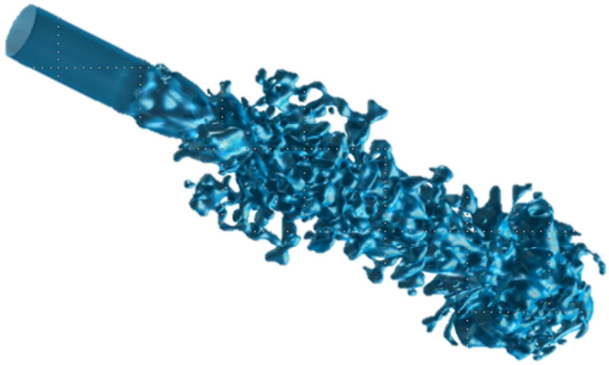
Computational Science & Engineering

計算科学技術部会　ニュースレター　第 30 号
AESJ-CSED　NEWSLETTER (No.30)
August 2018

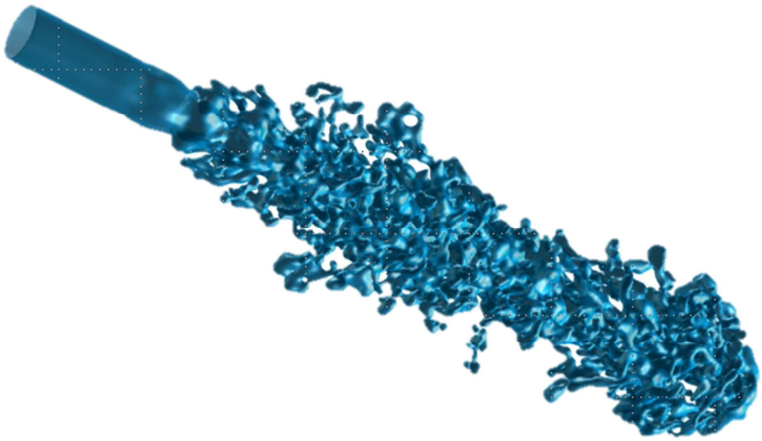
格子ボルツマン法による液体噴流の数値解析
（静止液体中に分散する液体噴流）



（0.15 秒後）　（0.3 秒後）　（0.45 秒後）



（0.6 秒後）



（0.75 秒後）

日本原子力学会 計算科学技術部会
ニュースレター 第 30 号

2018年8月

1. 巻頭言

2018 年度 部会長 伊藤 啓 1

2. 2017 年度 計算科学技術部会 部会賞 贈賞報告

4

3. 2018 年春の年会 計算科学技術部会全体会議 開催報告

14

4. 2018 年度 計算科学技術部会 役員紹介

16

5. 2018 年秋の大会 計算科学技術部会全体会議 開催案内

18

6. 2018 年秋の大会 計算科学技術部会 一般セッション開催案内

19

7. 2018 年秋の大会 計算科学技術部会 企画セッション開催案内

21

8. 一言一語 「ラジオリシス、腐食の分野での計算科学」

(一財)エネルギー総合工学研究所 内田 俊介 氏 22

9. 30 号特集記事 「計算科学技術部会のこれからを担う皆さんへ」

(初代出版・編集小委員長)MHIニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株) 佐治 悦郎 氏 31

10. 講習会・ワークショップ等の開催報告・連絡事項等

35

11. 年間予定

37

編集後記

38

表紙図提供：齋藤　慎平　氏（筑波大学大学院　博士課程）

（2017 年度　計算科学技術部会 CG 賞）

【格子ボルツマン法による液体噴流の数値解析】

表紙図は、格子ボルツマン法（LBM: Lattice Boltzmann Method）を用いて行った解析例．静止液体中に分散する液体噴流の数値解析を行い，二相界面を可視化した結果．界面が不安定化し，至る所で微小な液滴へと分裂している様子が見られる。

巻頭言

計算科学技術部会部会長挨拶

京都大学　准教授
伊藤　啓

日本原子力学会は、来年 60 周年の節目を迎えます。人間で言えば、還暦にあたる長い年月を経たことにより、いくつかの部会（具体名は挙げませんが）は高齢化などの問題に直面しております。その中で、計算科学技術部会は 2002 年設立、16 歳の比較的若い部会であり、まだまだ多くの伸び代が残されていると考えられます。実際、社会的にも AI やらビッグデータといった計算科学技術に関連する分野の研究が非常に注目されており、計算科学技術の重要性は増加し続けています。しかし、様々な産業分野において計算科学技術が大いに利用されていることを考えると、現状の部会員数や年会・大会での発表数は十分とは言えません。発表数は概ね 15~20 件で推移しており、開催 3 日中の何れか 1 日を通してセッションを開催することが多いですが、計算科学に関する発表自体は他の部会セッションでも多く行われているため、計算科学部会の発表数を倍増・3 倍増し、年会・大会を通じてセッションを開催することも夢ではないと考えております。そこで、計算科学技術部会の更なる発展のため、年会・大会での講演数増加に関して部会員の皆様から様々なアイディアを募り、今後の部会運営に活かしていきたいと考えております。例えば、以下のような方策は有効なのではないでしょうか。

① 計算科学技術部会セッションでの講演メリットの明確化

現状、計算科学技術を用いた講演の多くは計算科学技術部会ではなく他の専門的な部会（熱流動・核計算など）で行われています。この状況は、計算科学技術部会の設立趣旨にも書かれている“原子力に係わる全ての計算工学の分野の研究者が一堂に集まり、計算工学の研究をとおして交流すること”が達成されていないことを示していますが、逆に言えば、計算科学技術部会で講演する十分なメリットがあるのであれば、他の部会から多くの講演者をお迎えする（引き抜く）ことも可能です。まず、何故、今は計

算科学技術部会ではなく他の部会での講演が多いのかを考察すると、理由は多彩だとは思いますが、大きな理由として、(i.) これまで専門的な部会で講演してきているので講演の場を変える動機がない、(ii) 計算科学技術部会セッションでは深い議論ができない、などがあると思われます。(i) については、計算科学技術部会員の方々から積極的な勧誘を行って頂き、まずはお試しまで計算科学技術部会セッションで 1 回講演して頂き、専門的な部会とは別の視点からの有用な議論ができることを実感して頂くことが重要かと思います。ただし、その際に、講演者が（(ii) に挙げたように）議論が深まらなかったと感じてしまったら 2 度と講演してもらえないので、そうならないように、部会員の方々の様々な経験と専門性を総動員して頂き、有意義な議論を行うことが必須となります。すなわち、計算科学技術部会で講演・議論することにより、講演者が有用な情報と新たな人脈を得ることができるという状況ができれば、正のフィードバック効果によって講演者が急増することも考えられます。もちろん、これは簡単なことではありませんが、部会員の皆様のご協力があれば必ず実現可能なことであると信じております。

また、計算科学技術部会は、年会・大会での優秀な講演に対し、学生優秀講演賞や CG 賞などの部会賞を授与しております。特に学生は優秀講演賞受賞の可能性が高い（他の専門的な部会などと比較して発表者数が少ないため、受賞確率が高い)。実際の数字を挙げると、A 部会では学生講演 40 件中 3 件が優秀講演賞を受賞（受賞確率 7.5%）したのに対し、計算科学技術部会では学生講演 13 件中 4 件が受賞（受賞確率 31%!!）といった具合になっております。この差は非常に大きいのではないでしょうか。学生の皆様、また指導されている教員の先生方、是非、計算科学技術部会での講演をご検討ください。

② 特色あるセッションの提案

昨今、計算科学技術分野において、解析コードの検証 (V&V) が 1 つの大きなテーマとなっています。コード検証には様々な方法がありますが、その 1 つとして計算対象となる現象の実験結果などに基づくベンチマーク解析が挙げられます。既に様々な分野でベンチマーク解析の国際プロジェクトが行われており、国際会議などの場において大きな関心を集めています。すなわち、計算科学技術部会が中心となって、優れたベンチマーク問題の提案、参加者募集、年会・大会セッションでの結果報告、ということを行うことができれば，関連分野の研究者を中心に、新たに多くの人を計算科学技術部会に引き付けることができます。特に、ブラインド解析と呼ばれる問題の場合、事前に結果（実験結果など）が参加者に知らされないため、パラメーター調整などによって解析精度を高めることができず、解析結果の報告の場は非常にスリリングな舞台となります。そのため、聴講者にとっても非常に面白いセッションになることは間違いなく、また、各解析コードの実情なども垣間見ることができるため、解析コードの開発者、利用者にとっても有用な情報（気付き）が得られる場となるのではないでしょうか。もちろん、ベンチマーク解析の参加者の負荷は大きいですが、解析結果を論文化し、特集号などを出すことで成果を広く周知することにより、参加者のメリットも確保できるのではないかと考えます。

その他、比較的年齢構成の若い計算科学技術部会では、学生による様々な興味深い講演が行われておりますので、学生のみを対象としたセッションを組み、その中で学生優秀講演賞を競うという形にしてみることも面白いかもしれません。既に学生連絡会が運営するポスターセッションもありますが、計算科学技術に特化した形で学生セッションを開催し、比較的高確率で優秀講演賞を獲得できるということになれば、学生の講演も今以上に熱が入り、楽しいセッションになると思われます。

③ 国際会議・セミナーなどの活用

計算科学技術部会は、毎年秋に熱流動部会主催で行われる若手交流フォーラムを共催しています。フォーラムでは、若手研究者や学生のポスター発表と忌憚のない議論が行われ、参加者はとても濃密で有意義な時間を過ごすことができます。現状、計算科学技術部会からの参加者は多くありませんが、若手研究者の積極的な参加を促すことによって若手の研究レベルを向上し、計算科学技術分野の次代を担う人材の育成を図ることができると考えます。また、ご存知の通り、2020 年には計算科学技術部会の主催で SNA+MC2020 を千葉県の幕張にて開催致します。原子力分野におけるスーパーコンピューティングとモンテカルロ・シミュレーションに関する国際会議である SNA+MC2020 では、原子力分野に関わる数値計算について様々な講演が行われる予定であり、計算科学技術の裾野を広げ、計算科学技術部会員数の増加を図る絶好の機会になると考えます。その機会を逃さず、計算科学技術部会の発展に繋げる仕掛けを考えていきたいと思います。

以上、3 点私案を述べさせていただきましたが、何かご意見をお持ちの方は、年会・大会時に開催している総会の場や、部会 Web ページの問い合わせメールをご利用頂き、ご意見賜れれば幸いです。また、計算科学技術部会の発展に寄与したいとの志をお持ちの方は、是非、部会運営員会のメンバーに加わって下さい。心よりお待ちしております。

以上

2017 年度　計算科学技術部会　部会賞　贈賞報告

選考経緯

平成 30 年 1 月 15 日（月）を締め切りとして、部会メーリングリストおよび部会ホームページを通して、本年度部会賞候補者の募集を行いました。

平成 30 年 1 月 19 日（金）に表彰小委員会を開催し、推薦者の推薦書、業績（論文、予稿、部会のセッションでの聴講者の評価シート等）をまとめた資料を基に、慎重に審議致しました。その選考結果を同日開催された部会運営委員会にお諮りし、最終的に、部会功績賞 1 件、部会業績賞 1 件、部会 CG 賞 2 件、部会奨励賞 3 件、部会学生優秀講演賞 4 件の受賞候補者を決定致しました。

平成 30 年 1 月 31 日（水）まで、部会賞候補者の募集の締め切りを延長し、さらに候補を募りましたが、この期間の応募はなかったため、受賞候補者の変更はありませんでした。その後、受賞候補者が受賞条件を満たしていることを確認し、受賞者として確定致しました。結果は以下の通りです。

部会功績賞

計算科学技術分野において幅広くかつ顕著な貢献のあった個人を対象とし，毎年 1 名以内とする。

受賞者名：越塚　誠一　氏（東京大学大学院）（0109365）

業績名　：「粒子法に関する研究とその計算科学技術への貢献」

(英訳) Researches on Particle Method and Contribution to Computational Science and Engineering

贈賞理由：

越塚氏は非圧縮性流れを解析できる粒子法として MPS(Moving Particle Semi-implicit)法を独自に開発し、これまで気液二相流、沸騰、炉心溶融、蒸気爆発、溶融炉心コンクリート相互作用、液滴衝撃エロージョンといった原子力分野の様々な問題に適用してきた。こうした一連の成果はレビュー論文としてまとめられており、さらには船舶や防災などの原子力以外の分野にも粒子法は広がっている。

日本原子力学会春の年会および秋の大会では、計算科学技術のセッションにおいてシリーズ発表を多数行っている。「新技術を活用した高速炉の次世代安全解析手法に関する研究開発」は高速炉の過酷事故解析のための粒子法コードの開発に関するもので 2007 年春～2010 年秋に合計 44 件の発表を、「連成解析による気液二相流中構造物の振動・腐食評価手法の開発」は振動に対する流体-構造連成解析および腐食に対する流体-材料腐食連成解析に関するもので 2007 年春～2011 年秋に合計 57 件の発表および論文誌での発表を、「FAC による減肉予測の高度化とシステム安全評価への適用」は流れ加速腐食(FAC)に対する流体-材料腐食連成解析に関するもので 2012 年春に 7 件の発表を行った。

部会活動に関しては、2008 年春の年会の計算科学技術部会企画セッション「計算結果の信頼性」にお

いて講演し、その後、部会に設置された「シミュレーションの信頼性」ワーキンググループ(2010 年～2012 年）の幹事を務め、V&V (Verification and Validation)の普及に貢献している。また、計算科学技術部会発足当初より広報小委員会委員を務め、その後、部会長を務めるまで、長きにわたり部会の活性化に貢献した。副部会長兼企画小委員長の任期においては、部会長を補佐し、部会全体の様々な運営に尽力した。部会長の任期においては、ニュースレターの発刊、若手研究者の相互啓発等を目的とした若手フォーラムの開催、国際会議におけるスペシャルセッションの企画、学会事故調等に尽力している。また、部会に設置された「シミュレーションの信頼性」ワーキンググループ(2010 年～2012 年）の幹事を務め、V&V (Verification and Validation)の普及にも貢献している。

以上の理由から部会功績賞を贈呈することを決定した。

部会業績賞

計算科学技術分野において顕著な学術または技術上の業績のあった個人またはグループ（連名）を対象とし，毎年 2 件以内とする。原則として，当該年度の応募締切日時点で，学会和文論文誌あるいは英文論文誌のいずれかに，論文が掲載されていることを条件とする。

受賞者名：笠原　直人　氏（東京大学大学院）(0110375)

業績名　：「計算科学技術による高温構造システム設計の合理化」

(英訳) Rationalization of High-temperature Structural System Design by Computational Science and Engineering

贈賞理由：

笠原氏は、1984 年に動力炉・核燃料開発事業団に入社されて以降、高速炉をはじめとする高温構造システムの解析による設計に携わってこられた。

高温構造物で問題となる非弾性挙動に関して、非弾性有限要素解析技術の高度化に従事されるとともに、構造物中の応力ひずみ再配分機構を解明し、弾性追従概念に基づく簡便な非弾性挙動予測法を提案されるなど、機構論モデルに基づく合理的かつ実用的な非弾性解析手法を開発することで「非弾性解析による設計」の実現に多大な貢献をされている。日本原子力学会春の年会および秋の大会では、計算科学技術セッションにおいて「実用高速炉構造設計基準のための技術開発」(2003 年春～2006 年春、計 16 講演）など多数のシリーズ発表が行われている。

また、流体温度変動による構造物の高サイクル熱疲労に関して、き裂発生・進展特性の温度ゆらぎ周波数依存性に着目し、構造物の周波数応答関数とそれを用いた合理的かつ簡便な熱疲労評価法を開発された。本業績により、日本機械学会基準「S-017 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」の策定に貢献しただけではなく、高速炉 PHENIX の配管破損を契機として 1994 年から 1998 年にかけて行われた

IAEA 国際共同研究に参画されるなど国際的にも多大な貢献をされている。

さらに、従来特に我が国では手薄であった過酷事故条件に対する構造強度研究に関して、現実的な事故シナリオを描くために必要な、破損モードの特定と各破損モードに対する解析による最適限界強度評価から構成される「第 4 層（設計を超える状態）」に関する新しい構造強度評価の枠組みを構築された。日本原子力学会春の年会および秋の大会では、計算科学技術セッションにおいてシリーズ発表「極限荷重に対する原子炉構造物の破損メカニズム解明と破局的破壊防止策」(2015 年～2016 年春、計 18 講演）が行われている。

これらの成果はこれまで国内外で、さらには航空宇宙や石油化学などの原子力以外の分野でも高く評価されており、ASME Pressure Vessels & Piping Conference 優秀論文賞(2011 年、2015 年)、日本機械学会賞（論文）(2013 年)、日本溶接協会原子力研究委員会貢献賞（2017 年）等を受賞されている。

部会への貢献としては、2014 年度から 2016 年度にかけて、計算科学技術部会の副部会長、部会長を歴任されており、部会の発展・運営ならびに学会活動に尽力された。

以上、同氏は、最先端の計算科学技術を多数開発されたとともに、機構論的研究に基づき得られた知見の実用化に注力され、高温構造システムの設計評価法の高度化に多大な貢献をされている。同氏が確立されたこれらの手法は、原子力システムの安全性向上のための、より合理的な構造設計と対策を可能とするものであり、氏の果たした業績は極めて大きい。

以上の理由から部会業績賞を贈呈することを決定した。

<u>部会奨励賞</u>

部会奨励賞：計算科学技術分野において顕著な学術または技術上の業績のあった，おおむね 40 才まで（当該年度 3 月 31 日において）の個人を対象とし，毎年 3 名以内とする。少なくとも，応募締切日時点で学会が主催ないしは共催する国内外の会議等で口頭発表の実績を有していることを条件とする。

受賞者名：崔　炳賢　氏（日本原子力研究開発機構）(0224107)

業績名　：「原子力施設の地震リスク評価手法の信頼性向上に関する研究」

(英訳) Reliability Enhancement of Seismic Risk Assessment of Nuclear Facilities

贈賞理由：

崔氏は、原子力施設の地震に起因する地震リスク評価の信頼性向上に資するため、これまでに、原子炉建屋のフラジリティ評価における応答の不確実さの定量的評価の枠組みを提示するとともに、巨大地震後の余震発生について確率論的余震ハザード解析手法を提案し工学的応用を示した。

１．フラジリティ評価における不確実さの定量化

福島原子力発電所事故以降、地震リスク評価では、設計想定を超える地震動に対する現実的応答

評価のための対策への重点的取り組みが求められている。より現実的な応答評価のため、近年は原子炉建屋の 3 次元詳細モデルを用いた地震応答評価が行われることも多い。しかしながら、3 次元詳細モデルの構築は、技術者のノウハウによるものが大きく、モデル構築手法が確立したとは言い難いのが現状である。

本研究では、原子炉建屋の３次元詳細モデルを活用した地震応答解析における主要入力パラメータ（入力地震動・地盤物性・建屋地盤相互作用等）の違いが解析結果に与える影響を評価するため、原子炉建屋の 3 次元詳細モデル構築における各入力パラメータの感度解析を実施し、地震応答解析結果の不確実さ評価の枠組みを構築した。本成果は、今後 3 次元詳細モデルの標準化を進める上で重要な基礎となる。さらに、従来の質点系モデルと３次元詳細モデルの地震応答解析結果の比較より、モデル化手法による応答結果の違いから認識論的不確実さを分析し定量化した。その結果、フロアごとに不確実さ幅が異なるという知見を得ている。

２．確率論的余震ハザード解析手法の提案とその工学的応用

東北地方太平洋沖地震の後、非常に広い領域において余震が多発した。このような余震により二次災害や救助活動・復旧作業の遅れが発生した。余震とはいえ本震と同等の地震が発生する可能性もあり、特に熊本地震以降、余震ハザード評価の必要性が増している。しかし、本震が発生する前に余震ハザードを評価することは不確実さが大きいため容易ではない。一方、巨大地震が発生すると、大きな不確実さのもとで意思決定をしないといけないため、その不確実さを定量化することは重要である。そこで、崔氏は、不確実さが大きいため今まであまり考慮されてこなかった、将来の巨大地震に対する復旧活動計画のための確率論的余震ハザード解析法を提案した。さらに、提案した確率論的余震ハザード解析の活用法について検討し、工学的応用例を示した。まず、復旧活動計画に活用するための余震ハザードマップを提案し、続いて、避難ビルや原子力施設等の耐津波設計における余震と津波の同時考慮のための荷重耐力係数を導出する手法について提案した。

崔氏は、シミュレーションによる原子力施設の地震リスク評価およびその活用の観点からも計算科学技術分野における今後の活躍と貢献が期待できる。

以上の理由から部会奨励賞を贈呈することを決定した。

受賞者名：稲垣　健太　氏（電力中央研究所）(0201112)

業績名　：「原子炉事故解析に向けたマルチフィジックス粒子法コードの開発」

(英訳) Development of a multi-physics MPS code for the severe accident simulation

贈賞理由：

本研究は、主に超弾性体解析や破断解析等に利用されてきたマルチフィジックス粒子法コードに対し、適用例の少ない伝熱現象や化学反応モデルの導入に成功したものであり、原子炉事故事象のような複雑

現象の解析の実現に向けた成果が得られている。

原子炉のシビアアクシデント(SA)時には、燃料や炉心構造材をはじめとする炉内物質の溶融や凝固、それらの物理／化学的相互作用による物質の移動や体系の大変形など、非常に複雑な現象が生じる。福島第一原子力発電所の事故を契機に、特に国内でこれらの現象解明に向けた研究開発が数多く行われている。

稲垣氏は、主に自由表面を有する流体や不連続流体の解析に適用されてきた従来のマルチフィジックス粒子法（MPS 法）をベースに、SA 時の複雑な炉内現象の解析を可能とする MPS 法コードの開発を進めている。

SA 解析では、熱伝導、界面熱伝達、熱輻射、溶融凝固、流体と剛体との練成、表面張力、気相抵抗などに支配される現象が多く、これらをモデル化することで、燃料の溶融過程や溶融燃料の噴出、飛散および冷却材との相互作用による固化形状等の解析を可能とした。また、実際の SA 時には、燃料などの物質が単体で溶融するだけでなく、複数の炉内物質の共晶反応によって融点以下の温度で溶融が発生することが多く、これらを適切に取り扱うことのできる共晶反応モデルの開発も重要となる。そこで、稲垣氏は、系内に含まれる各物質の濃度を粒子の変数として新たに定義し、その時間変化を先行例（A. Mustari, et al., Annals of Nucl. Energy 81 (2015)）同様、非定常拡散方程式の離散化モデルによって評価するとともに、物性値に基づく成分濃度の関数として溶融温度を与えることで共晶反応のモデル化を行った。さらに、1200℃における鉄（Fe）とウラン（U）の反応による検証解析を行い、U が Fe 中に拡散して行き、共晶反応よって Fe が溶融する様子や Fe と共晶溶融物の間に UFe2 の中間相が生成される様子を MPS 法の利点を活かして視覚的に再現するなど、物性値を反映した共晶などの界面反応のモデル化にも成功した。

MPS 法は、自由表面のある流れ解析や大変形をともなう超弾性体解析、構造体破断解析に適した特徴を有する手法として近年注目されているが、稲垣氏による上記の成果は、これまであまり適用例がなかった MPS 法による伝熱現象や化学反応を含む系の解析を可能としたものである。これは、原子炉の事故事象解析の実現に向けた大きな成果であるとともに、様々な複雑現象への適用可能性を広げるものである。

以上の理由から部会奨励賞を贈呈することを決定した。

受賞者名：南波　宏介　氏（電力中央研究所）(0187852)

業績名　：「竜巻飛来物に対する鉄筋コンクリート製や鋼製構造物の損傷評価法に関する研究」

(英訳) Study on damage evaluation method of RC and steel structure subjected to tornado missile Impact

贈賞理由：

原子力発電所の新規制基準では、設計・運転で考慮すべき自然現象として竜巻が新たに設定され、竜巻に対する影響評価が必要となった。このため、このような竜巻に伴う高速飛来物（竜巻飛来物）から既存施設を防護する対策工の設置や衝突時における施設の構造健全性評価法の開発が喫緊の課題となっていた。

南波氏は、電気事業としては初めての取り組みとなる、竜巻飛来物に対する防護対象施設の構造健全性評価に関する一連の研究開発を実施してきた。既往研究では、鉄筋コンクリート（RC）製構造物については衝撃荷重作用時の貫通・裏面剥離に対するコンクリート限界厚評価式が、鋼製構造物については弾丸等に対する鋼板貫通限界厚評価式（BRL 式）存在する。しかしながら、竜巻飛来物を想定した入力パラメータの設定方法や適用範囲等が不十分であるため、RC 製および鋼製構造物を対象に、数値解析コードを用いた評価が可能な衝撃応答解析評価方法を提案した。特に、ひずみ制限値を用いた損傷評価法の妥当性を高速飛来物衝撃試験で明らかにし、これら研究成果を学術論文として発表し、科学的知見に基づく合理的な竜巻影響の対策手法の実施が可能となることに貢献している。

以上の理由から部会奨励賞を贈呈することを決定した。

<u>部会 CG 賞</u>

原子力の計算科学技術分野において結果の表示・可視化について優秀な業績のあった個人またはグループ（連名）を対象とし，毎年 2 件以内とする。 少なくとも，応募締切日時点で国内外の会議等で口頭発表の実績を有していることを条件とする。

受賞者名：齋藤　慎平　氏（筑波大学大学院）(5086555)

業績名　：「格子ボルツマン法によるジェットブレークアップ挙動の数値シミュレーション」

(英訳) Numerical Simulation of Jet Breakup Behavior with Lattice Boltzmann Method

贈賞理由：

齋藤氏は、原子炉の過酷事故時に生じうる溶融ジェットブレークアップ挙動を対象として、格子ボルツマン法を用いた数値シミュレーションを行った。二相系格子ボルツマン法に基づく計算コードを開発し、この際に衝突項を精緻にモデル化することにより、従来の格子ボルツマン法では数値的に極めて困難であった実条件におけるジェットブレークアップの数値シミュレーションを可能とした。本計算コードを用いて、同氏が過去に実施した実験結果をよく再現することを確認しており、さらに、スーパーコンピュータを用いた実機相当条件でのシミュレーションを行い、微粒化物が生成する過程やその径分布などを評価している。以上の成果は、実条件におけるジェットブレークアップ現象の理解を深める基礎的知見となる重要な成果である。

以上の理由から部会 CG 賞を贈呈することを決定した。なお、同氏には、同じ研究成果により、部会

学生優秀講演賞も贈呈することを決定した。

受賞者名：高畑　和弥　氏（東京大学大学院）(5091880)

業績名　：「大規模固気混相流体系における混相流-臨界連成手法の開発」

(英訳) Development of a coupled method for a multi-phase flow and nuclear criticality in a large-scale gas-solid flow system

贈賞理由：

高畑氏は、現在、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻博士課程に所属しており、現在、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業廃炉加速化研究プログラム（日英原子力共同研究）に取り組んでいる。この研究の中で、高畑氏は、英国 Imperial College London の研究グループと協力して、固気混相流体系における混相流-臨界連成手法を新たに開発した。本手法では、最先端の固気混相流計算手法の DEM-CFD 法とモンテカルロ法コード MCNP を連成するものである。さらに、固気混相流の数値解析結果において、レイトレーショング法による写実的描画手法の高度な可視化技法を採用した。本研究成果は、将来的に燃料デブリ取り出しに応用されることが期待されており、エンジニアが燃料取り出し時の粉体の飛散状況や臨界評価をリアリティのある可視化映像を生成しながら評価できる点が画期的である。このように、高畑氏の取り組んだ研究は、高度化コンピュータグラフィック技術を臨界評価に取り入れた独創的な研究である。

以上の理由から部会 CG 賞を贈呈することを決定した。

<u>部会学生優秀講演賞</u>

部会学生優秀講演賞：計算科学技術分野において，他の模範となる講演を行った学生を対象とし，毎年 4 名程度とする。日本原子力学会「春の年会」あるいは「秋の大会」での計算科学技術セッション（区分コード 307-1）で口答発表していることを条件とする。

受賞者名：齋藤　慎平　氏（筑波大学大学院）(5086555)

業績名　：「格子ボルツマン法によるジェットブレークアップ挙動の数値シミュレーション」

(英訳) Numerical Simulation of Jet Breakup Behavior with Lattice Boltzmann Method

贈賞理由：

同上。

受賞者名：鹿島　真人　氏　（東京大学（現 株式会社オールアバウト)）(0229079)

業績名　：「数値シミュレーションによる微粒子凝集体の見かけ粘度の評価」

(英訳) Numerical evaluation of apparent viscosity for an agglomerated fine particles

贈賞理由：

鹿島氏は、東京大学工学部システム創成学科（発表当時）に所属して、白金族粒子を含む溶融ガラスの見かけ粘度と凝集粒子構造の解明に取り組んだ。既存研究において、白金族粒子を含む溶融ガラスは非ニュートン流体であり、シェアシニング性を示すことが知られていたが、そのメカニズムが未解明であった。この研究の中で、鹿島氏はガラスビーズに白金族粒子がコーティングされることによりシェアシニングが発生する仮説を提案した。鹿島氏は固体粒子間接触力を精度良く評価する離散要素法と直接計算法を連成した数値シミュレーションを実行してこの仮説の証明を試みた。本研究を通して、数値シミュレーションと既存研究の結果が整合したため、この仮説は白金族粒子を含む溶融ガラスの非ニュートン性を説明する上で有力であると考えられる。また、本研究成果は、核燃料サイクルの最終工程のガラス溶融炉の安定運転にも大きく貢献できる。このように、鹿島氏は、微粒子凝集体のレオロジー特性の有力な仮説を世界で初めて示す独創性の高い研究に取り組んだ。

以上の理由から部会学生優秀講演賞を贈呈することを決定した。

受賞者名：田村　耕太郎　氏　（東京大学大学院）(5095778)

業績名　：「DEM 粗視化モデルを用いた固気液三相流の数値シミュレーション」

(英訳) Numerical simulation of a gas-solid-liquid flow by using a coarse grain model of the DEM

贈賞理由：

田村氏は、現在、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻修士課程に所属しており、現在、燃料デブリ取り出しにおける固液分離プロセスの開発に取り組んでいる。この研究の中で、田村氏は DEM 粗視化モデルと呼ばれる離散要素法のスケーリング則モデルと最先端の自由液面捕捉法の VOF 法を融合した世界最先端の固気液三相流手法を用いて、大規模固気液三相流体系における固体粒子のマクロ挙動がスケーリング則を用いて再現できることを示した。本研究では、回転円筒容器体系において、種々の条件において Verification test を行い、精緻に妥当性検証を行ったことが評価される。これにより、本手法を燃料デブリ取り出し体系ばかりでなく、化学工学・機械工学のような一般産業の固気液三相体系にも応用できることを示した。このように、田村氏の取り組んだ研究は、総合工学の原子力工学で開発された数値シミュレーション手法が幅広い産業に応用できる点が大きく評価できる。

以上の理由から部会学生優秀講演賞を贈呈することを決定した。

受賞者名：森田　直樹　氏　（東京大学大学院）(5094129)

業績名　：「並列有限要素法のための直接法・反復法統一的線形ソルバ」

(英訳) Monolithic Linear Equation Solver Including Direct and Iterative Method for Parallel

Finite Element Method

贈賞理由：

森田氏は、並列有限要素法の基盤技術である並列反復法アルゴリズムの研究と実産業問題における適用性評価に取り組み、博士課程においては、査読論文 3 件が採択され、学会発表 10 件を行った。重要構造物、例えば、原子力建屋と地盤の連成系などにおける大規模解析へのニーズをくみ取り、並列演算性能に優れた有限要素の定式化およびプログラム開発を行い、解析システムの機能強化と普及促進に大きく貢献できる成果を残している。

以上の理由から部会学生優秀講演賞を贈呈することを決定した。

（お知らせ）第１６回（２０１８年度）日本原子力学会 計算科学技術部会賞 受賞候補者推薦の募集

※募集期限　２０１８年：１２月２１日(金)、贈呈(予定)日　２０１９年３月春の年会期間中

第１６回「日本原子力学会 計算科学技術部会賞」受賞候補者の推薦を募集いたします。以下の募集要綱をご参考の上，適当と思われる部会賞候補者を多数ご推薦下さるようお願い申し上げます。

【募集要綱】

１．受賞資格　原則として本部会の会員

２．募集方法　正会員または賛助会員代表者の推薦による（自薦・他薦を問わない)。

３．受賞対象　原子力における計算科学技術分野の発展，進歩に顕著な貢献を為した個人又はグループとする。

４．賞の種類等

(1)　部会功績賞：計算科学技術分野において幅広くかつ顕著な貢献のあった個人を対象とし、毎年 1 名以内とする。

(2)　部会業績賞：計算科学技術分野において顕著な学術または技術上の業績のあった個人またはグループ（連名）を対象とし、毎年２件以内とする。原則として、当該年度の応募締切日時点で、学会和文論文誌あるいは英文論文誌のいずれかに、論文が掲載されていることを条件とする。

(3)　部会奨励賞：計算科学技術分野において顕著な学術または技術上の業績のあった　おおむね４０才まで(当該年度３月３１日において)の個人を対象とし、毎年３名以内とする。少なくとも、応募締切日時点で学会が主催ないしは共催する国内外の会議で口頭発表の実績を有していることを条件とする。

(4)　部会 CG 賞：原子力の計算科学技術分野において結果の表示・可視化について優秀な業績のあった個人またはグループ（連名）を対象とし、毎年 2 件以内とする。 少なくとも、応募締切日時点で国内外の会議等で口頭発表の実績を有していることを条件とする。

(5)　部会学生優秀講演賞：計算科学技術分野において、他の模範となる講演を行った学生を対象とし、毎年４名程度とする。日本原子力学会「春の年会」あるいは「秋の大会」での計算科学技術セッション（区分コード 305-1）で口答発表していることを条件とする。

(6)　部会功労賞：計算科学技術部会の発展に顕著な功労のあった個人を対象とし、毎年２名以内とする。

(7)　その他

・部会業績賞・部会ＣＧ賞・部会奨励賞は，募集期限を起点とする過去の３年間に公表された原子力平和利用に関する学術および技術上の優秀な成果を対象とする。ただし，複数の会員が共同してなした成果であっても，受賞者は原則として３名以内とする。

・上記のいずれの賞も，該当する対象がないときは授与しないものとする。

５．賞　本賞は表彰楯又は賞状とする。

６．応募方法　所定の推薦書に必要事項を記し，論文別刷などの参考資料と併せて，本ページ最後に記載の「問い合わせ・応募先」まで送付して下さい。なお，部会ＣＧ賞については，当該表示・可視化技術によるＣＧ（静止画あるいは動画）の代表的事例も併せて送付して下さい。その際，ＣＧのタイトルと簡単な説明（100 字～300 字程度）も送付して下さい（ＣＧのサイズが大きく e-mail で送れない場合は，別途郵送先をご連絡致しますので，その旨お知らせ下さい)。送付されたＣＧについては，ニュースレターの表紙やホームページでの公開，および，（ダウンロード等による）提供等に使用させていただくことがあります。従いまして，ＣＧの著作権にご注意ください。

（著作権に関する注意点については，日本原子力学会の HP にある「著作権に関する注意点」（以下 URL）をご参考ください。

http://www.aesj.net/publish/jnst/copyright-duplicate-attension）

７．募集期限　２０１８年１２月２１日（金）必着〔下記「応募先」の項参照〕

８．選考結果の通知　選考結果は，２０１９年２月下旬に通知する。

９．贈呈(予定)　２０１９年３月 日本原子力学会２０１９年春の年会
計算科学技術部会全体会議時

１０．その他　「受賞概要」を計算科学技術部会ホームページ及びニュースレターに掲載する。

１１．選考　計算科学技術部会内に表彰小委員会を設置して選考を行う。

問い合わせ・応募先：日本原子力学会計算科学技術部会部会長　伊藤　啓

e-mail：award@csed.sakura.ne.jp

以上

平成29年度日本原子力学会春の年会 計算科学技術部会
第15回部会賞表彰式および第23回全体会議
議事録（案）

１．日時：平成30年3月26日（月） 12:00～13:00

２．場所：大阪大学 吹田キャンパス C会場

３．議事次第

（１）平成29年度第15回部会賞表彰式

　　１）部会賞表彰

（２）平成29年度第23回全体会議

　　１）部会長挨拶

　　２）小委員会活動報告

　　a. 総務小委員会

　　b. 企画小委員会

　　c. 広報小委員会

　　d. 出版・編集小委員会

　　e. 経理小委員会

　　f. 国際会議準備小委員会

　　g. 表彰小委員会

　　３）その他

　　４）次期役員選出

　　５）次期部会長挨拶

　　６）告知等

４．議事概要および決定事項（敬称略）

（１）平成29年度第15回部会賞表彰式

　１）部会賞表彰

　　受賞者は以下の 5 件 11 名である。

①	部会功績賞	越塚　誠一氏	（東京大学大学院）
②	部会業績賞	笠原　直人　氏	（東京大学大学院）
③	部会奨励賞	崔　炳賢　氏	（日本原子力研究開発機構）
	同上	稲垣　健太　氏	（電力中央研究所）
	同上	南波　宏介　氏	（電力中央研究所）
④	部会 CG 賞	齋藤　慎平　氏	（筑波大学大学院）

	同上	高畑　和弥　氏	（東京大学大学院）
⑤	部会学生優秀講演賞	齋藤　慎平　氏	（東京大学大学院）
	同上	鹿島　真人　氏	（東京大学大学院） （現 株式会社オールアバウト）
	同上	田村　耕太郎　氏	（東京大学大学院）
	同上	森田　直樹　氏	（東京大学大学院）

（２）平成29年度第23回全体会議

１）部会長挨拶

巽部会長より挨拶がなされた。

２）小委員会活動報告

各小委員会の委員長より今年度活動と次年度活動計画の報告がなされた。

３）その他

なし。

４）次期役員選出

次期役員として、以下の5名が選出された。

部会長	伊藤　啓	（京都大学）
副部会長	高田　孝	（日本原子力研究開発機構）
副部会長	茶木　雅夫	（エネルギー総合工学研究所）
副部会長	光安　岳	（日立製作所）
副部会長	巽　雅洋	（原子力エンジニアリング）

また、各委員会の委員長等が選出された。

総務小委員会	鈴木　喜雄	（日本原子力研究開発機構）
企画小委員会	鈴木　正昭	（東京理科大学）
広報小委員会	高田　孝	（日本原子力研究開発機構）
出版・編集小委員会	田中　正暁	（日本原子力研究開発機構）
経理小委員会	光安　岳	（日立製作所）
国際会議準備小委員会	大谷　孝之	（日本原子力研究開発機構）
表彰小委員会	伊藤　啓	（京都大学）
部会等運営委員会	茶木　雅夫	（エネルギー総合工学研究所）

５）次期部会長挨拶

伊藤次期部会長より挨拶がなされた。

以上

2018 年度　計算技術部会　役員紹介

執行部

部会長	伊藤　啓	京都大学
副部会長	高田　孝	(国研)日本原子力研究開発機構
副部会長	茶木　雅夫	(一財)エネルギー総合工学研究所
副部会長	光安　岳	(株)日立製作所
副部会長	巽　雅洋	(株)原子力エンジニアリング

総務小委員会

委員長	鈴木 喜雄	(国研)日本原子力研究開発機構
	羽間 収	伊藤忠テクノソリューションズ(株)
	宮村 浩子	(国研)日本原子力研究開発機構

経理小委員会

委員長	光安 岳	(株)日立製作所
	和田 怜志	(株)東芝

広報小委員会

委員長	高田 孝	(国研)日本原子力研究開発機構
	桐村 一生	三菱重工業(株)
	木村 佳央	(株)中電 CTI

企画小委員会

委員長	鈴木 正昭	東京理科大学
	伊藤 高啓	名古屋大学

出版・編集小委員会

委員長	田中 正暁	(国研)日本原子力研究開発機構
	田村 明紀	(株) 日立製作所
	村上 貴裕	(一財)電力中央研究
	山下 晋	(国研)日本原子力研究開発機構
	酒井 幹夫	東京大学

国際会議準備小委員会

委員長	大谷　孝之	(国研)日本原子力研究開発機構

表彰小委員会

委員長	伊藤　啓	京都大学

部会等運営委員会

委員	茶木　雅夫	(一財)エネルギー総合工学研究所

以上

2018 年秋の大会　計算科学技術部会全体会議　開催案内

１．日時：　平成30年9月7日（金）　12:00～13:00

２．場所：　H会場（B棟 B32）

３．議事次第（案）

（１）部会長挨拶

（２）小委員会上期活動報告

a. 総務小委員会

b. 企画小委員会

c. 広報小委員会

d. 出版・編集小委員会

e. 経理小委員会

f.　表彰小委員会

（３）告知等、その他

以上

2018 年秋の大会　計算科学技術部会

一般セッション開催案内

17:45~18:30　　構造解析

原子力原子力施設全体規模の構造解析に向けた要素毎有限要素接触解析手法：階層化手法における加算順序の自動最適化

鈴木 喜雄（原子力機構）、井原 遊、奥田 洋司 （東京大学）

斜め衝突による RC 版の局部損傷評価 に関する研究 飛翔体先端形状による 影響評価検討

康 作夷、永井 穣、西田 明美、坪田 張二（原子力機構）

9:30~10:50　　事故解析

設計条件外での原子炉隔離時冷却系の動作条件の実験・解析評価（1）全体計画

茶木 雅夫、都築 宣嘉(エネ総研)

設計条件外での原子炉隔離時冷却系 の動作条件の実験・解析評価（2）SA コードモデルの検討

森田 能弘、木野 千晶、茶木 雅夫(エネル ギー総合工学研究所)

国産 SA コード SAMPSON の高度化（2）制御インターフェースモジュー ルの開発

冨永 直利(エネルギー総合工学研究所(現:アドバンスソフト))、Finger Richard（エネルギー総合工学研究所(現:ゴールドマン・サックス証券)、茶木 雅夫（エネルギー総合工学研究所）

MELCOR,SAMPSON による MCCI 現象の分析（4）燃料デブリ挙動の概要と MELCOR 解析

氷見 正司、森田 秀利（アドバンスソフト）、中村 康一（電中研）

統計的安全評価における代替統計モデルの適用（2）実機条件に対する不確かさ解析への適用性に関する検討

木下 郁男(INSS)

10:50~12:00　　微視的解析

MD 法による中性子照射か結晶欠陥生成に及ぼす材料物性の影響 (4) 応力負荷の影響

川満 昭英、早川 頌(東京大学大学院工学系研究科)、沖田 泰良（東京大学人工物工学研究センター）、板倉 充洋（日本原子力研究 開発機構)

On-the-fly キネティック・モンテカルロ法を用いた面心立方金属中における照射誘起欠陥の挙動に関する検討

早川 頌（東大院・工）、*柴崎 京介(東 大・工)、沖田 泰良（東大・人工物）、板倉 充洋（JAEA-CCSE）、Xu Haixuan（テネシー大学、Osetsky Yuri N（オークリッジ国立研究所)

MD 法を用いた原子空孔集合体-転位 相互作用に及ぼす積層欠陥エネルギーの影響解明(4)

土井原 康平（東京大学大学 院工学系研究科）、*沖田 泰良(東京大学人工物工学研究センター)、板倉 充洋（日本原子力研究開発機構)

スペクトル法を用いた重イオン衝突過程の精密計算 II

岩田 順敬(東京工業大学 科学技術創成研究院)、武井 康浩（みずほ情報総研）、楚 天舒（千葉大学理学部）、李 必恒（芝浦工業大学工学部)

14:45~15:50　　燃料・炉心解析

深層学習による燃料装荷パターンの直感的生成手法の検討 (2)畳み込みニューラルネットワークの活用に関する検討

石谷 和己(原電エンジニアリング)

二酸化ウランおよびガンマ鉄のノンコリニア常磁性状態の第一原理計算

板倉 充洋(JAEA)、沖田 泰良(東京大学)、中村 博 樹(JAEA)

IGA 法を用いた中性子輸送計算手法の研究 (1) 2 次元の解析

堀田 理穂(福井大学 大学院)、W.F.G. van Rooijen (福井大学附属国際原子力研究所)

IGA 法を用いた中性子輸送計算手法の研究 (2) 3 次元の解析

Van Rooijen Willem(福井大 学附属国際原子力工学研究所)、堀田 理穂(福井大学大学院)

以上

2018 年秋の大会　計算科学技術部会

企画セッション開催案内

◆　人工知能技術の活用と将来展望

日時：2018 年 9 月 7 日（金）13:00 ～ 14:30　H 会場（B 棟 B32）

座長：伊藤　啓（京大）

(1) 深層学習によるき裂進展予測のためのサロゲートモデルの構築

（近大）和田　義孝

(2) 計算力学シミュレーションを機械学習に置き換える技術の基礎的検討

（東洋大）中林　靖

(3) 画像処理、AI 活用による原子炉検査の高度化

（日立製作所）細谷　直樹

【要旨】近年、人工知能は多種膨大な情報を統合・利活用して問題解決するための基盤的計算科学技術となっている。一方で、一つ一つの意思決定がその後の大きなリスクの顕在化に強く寄与し得る原子力分野にあっては、科学的根拠に基づく合理的な判断を下す必要があることから、人工知能技術のブラックボックス性（なぜそのような結果が出力されるのか、といった結果の意味解釈の困難さ）などが問題となる可能性がある。

本企画セッションでは、人工知能技術の現状と構造・流体解析、検査高度化への活用について講演を行い、原子力分野における人工知能技術の課題や将来展望などに関して議論する。

以上

一言一語

原子炉水化学分野における計算科学技術
－ラジオリシス、腐食分野での計算科学－

（一財）エネルギー総合工学研究所
内田 俊介

はじめに

原子力工学の分野の中でも、化学関連分野は、実験事実、経験に基づく対応が主流で、計算科学技術とは少し距離をおく分野と想像されるのではないかと考える。同じ化学分野でも、燃料関連は、照射下の燃料の振る舞いを予測する巨大なソフトが知られているし、材料分野では、特に核融合炉を対象に、照射下での材料の特性評価や第１原理に基づく材用物性の評価など、さまざまな切り口で計算科学技術の寄与が見られる。そのなかで、原子炉水化学における計算科学技術関連の活動の最近の状況を紹介する。

１．原子炉水化学とは

原子炉冷却材、中性子減速材としては、様々な材料が挙げられる[1]。しかし、軽水炉で使用される水（H_2O：軽水）は、地球上で最も大量に存在し、原子炉で要求される冷却性能、減速性能、放射線遮蔽性能、熱容量、高温安定性、耐放射線性、放射化の少なさ、入手の容易さ、透明性、価格、のいずれの視点からもトップレベルの材料である。軽水炉における冷却水の役割は、原子炉冷却およびタービン系へのエネルギーの輸送と中性子減速であるが、高温で用いられるため、主として燃料被覆管、構造材などの腐食に起因する種々のアドバース効果を生ずる（図１）[2]。

プラントの燃料、構造材には、それぞれの目的に応じた様々な材料が使用されており、複雑な材料システムのもと、一元的な水化学管理により、これらの腐食事象を如何に適切に抑制し、プラントの全体の健全性を確保するかという点が、原子炉水化学の最大の眼目である。

２．水化学分野で適用されている計算科学技術

水化学では、冷却水の水質（温度、pH、溶存酸素濃度などの水化学因子）を、プラントの視点から、見守り、適切に管理することが第一義である。主として問題解決型の技術を中心に活動していた時期には、上記のような計算科学技術とは縁遠い状況であった。しかし、受身の問題解決型から積極的な問題予測型へと発展する際には、絶えず先を予測し、先手管理で問題発生の芽を摘み取ることが不可欠とな

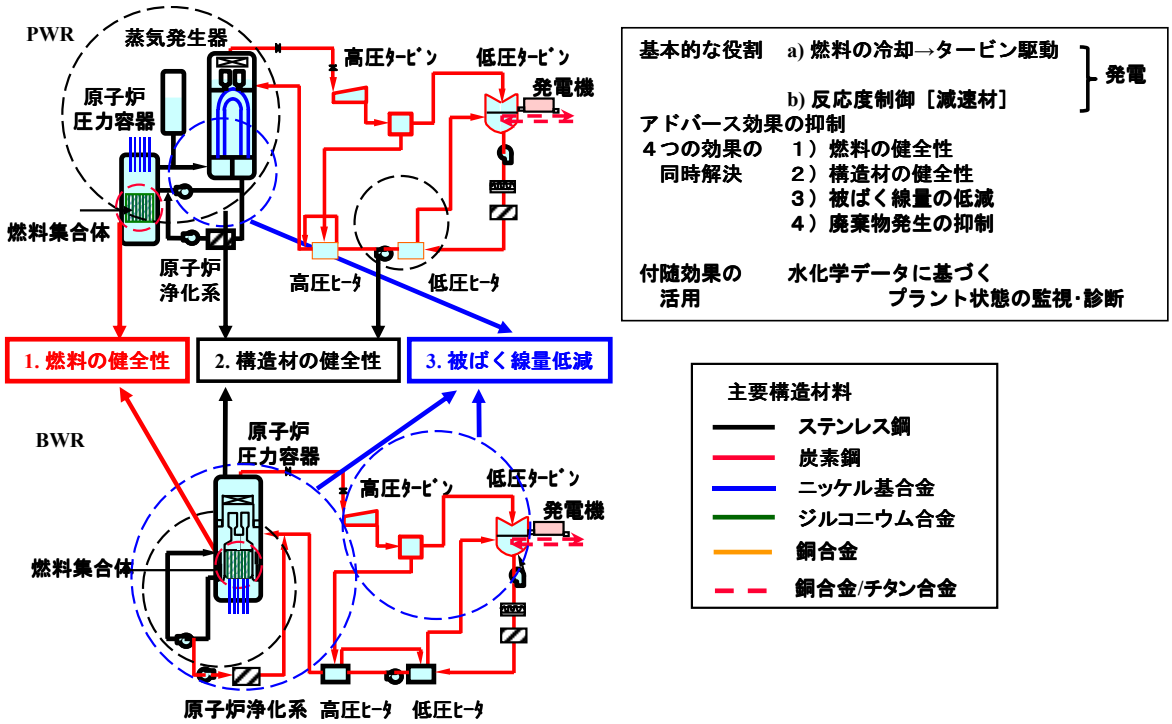


図１　軽水炉プラントにおける水の役割[材料アトラスと主要効果]

表１　原子炉水化学分野での主な現象シミュレーション

対象	現象支配機構	数学的な取扱い
燃料健全性の確保	被覆管の外部腐食	・腐食環境の予測モデル（下記構造材に同じ）
構造材の健全性確保		
・腐食環境(BWR､PWR1次系)*	・ラジオリシス生成種による腐食加速	・非線形多元連立方程式と流動起因質量移行 ・混成電位モデルによる腐食電位評価
・SCC亀裂発生･進展	・材料/応力/腐食環境相互作用	・亀裂進展と応力拡大係数の連成解析
・腐食環境（PWR2次系）	・クレビス部でのアニオンの沸騰濃縮	・実験値の補間･外挿
・配管減肉*	・材料/流動/腐食環境相互作用	・酸化被膜成長と腐食電流の連成解析
・余寿命予測	・上記支配因子重畳による材料劣化	・確率論的な寿命評価
被曝線量の低減		
・線量率予測（BWR）	・腐食生成物の移行､放射化､局所蓄積	・沸騰析出/剥離/溶解
・同上　　（PWR）	・腐食生成物の移行､放射化､局所蓄積	・温度･pH依存溶解度による析出/溶解
プラント状態の監視･診断	水化学因子と材料の相互作用 （腐食現象に結果と腐食現象への影響）	・上記モデルを駆使したAIツール評価

＊ 計算科学技術の適用について以下に記述

っている。すべての水化学の分野で、問題予測型に移行しているわけではないが、こういったことを念頭に、水化学は大きく舵を切っている。**表 1** に水化学の分野で見られる計算機シミュレーションの事例を示す。このうち、筆者も関与したラジオリシスの理論解析とその腐食環境評価への展開と腐食環境手法の配管減肉評価への展開について以下に紹介する。

２．ラジオリシスの理論解析

2.1 開発の背景

水は放射線照射下でも比較的安定ではある。しかし、中性子あるいはガンマ線照射下では、H と O の原子をつなぐ鎖が切れて、各種ラジカルが生成し、これらが相互反応を繰り返すことにより、酸素、過酸化水素などの腐食性の分子、あるいは OH などのラジカルが蓄積する。**図 2** に BWR を例に、原子炉ほかでの冷却水の流路にそっての主要な反応を模式的に示す[3]。

ラジオリシス解析が急速に発展した背景には、BWR における水素注入による SCC の発生･進展抑制のための腐食環境緩和策（溶存酸素濃度低減策）の適用がある。それ以前では、BWR でも、PWR でみられるように、高濃度の水素（原子炉炉心部で ppm オーダ）の注入が必須と考えられてきたが、1979 年 11 月に Oskarsham-2 で給水中に 0.5ppm 程度の水素（原子炉水では 50ppb 程度になる）を添加することで、SCC の保護対象となる再循環系での腐食電位を低減できることが報告された[4]。また、再循環系での水素による酸化種濃度の低減効果が、原子炉々心よりも、主としてダウンカマ部での酸素と水素の再結合によることが推察された。これらの事実から、①溶存酸素濃度は水素注入量に依存すること、②腐食電位は酸素濃度より過酸化水素濃度によって決定されること、そして③水素注入による酸化種（酸素と過酸化水素）の低減効果は、再循環系の場所によって異なることが認識された。再循環系で酸化種濃度および腐食電位の測定できる場所は限られているため、測定できない箇所での酸化種濃度低減効果（SCC 緩和効果）の把握が必須となり､伊部らのラジオリシスモデル開発が口火を切って､この理論解析が急速に立ち上がった[5]。

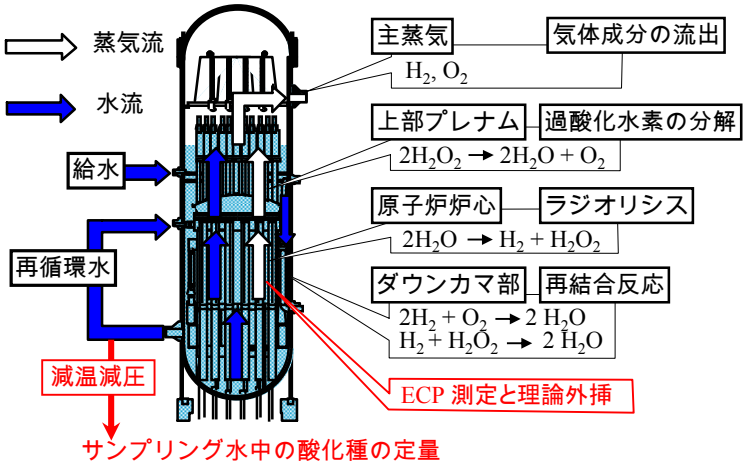


図2 BWR冷却系での主なラジオリシス反応

2.2 ラジオリシス理論モデル

冷却水流路に沿ってのラジオリシス生成種の移行を模式的に**図 3** に示す。また、プラント全体でのラジオリシス反応に係

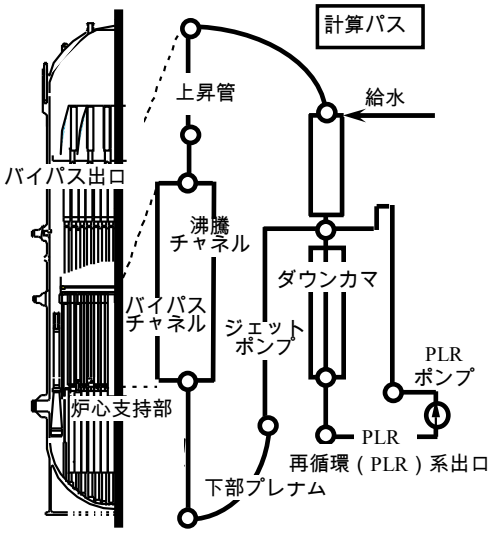


図 3 ラジオリシス計算のための冷却水流路.

表2 ラジオリシスモデルの基本式

流路にそってのマスバランス方程式

$$\partial C_l/\partial t = \underbrace{-\nabla(UC_l)}_{(i)} \underbrace{+ q_l}_{(ii)} \quad (1)$$

ラジオリシス生成種の生成と相互反応による質量バランス式

$$q_l = \underbrace{G_l^{\gamma}P^{\gamma} + G_l^{n}P^{n}}_{(iii)} \underbrace{+\Sigma_{mn}k^{l}_{mn}C_mC_n}_{(iv)} \underbrace{- C_l\Sigma_s k_{ls}C_s}_{(v)} \underbrace{+ V_f/(1-V_p)(\varepsilon^*_l C^{\gamma}_l - \varepsilon_l C_l)}_{(vi)} \quad (2)$$

(i) 流入および流出　(ii) 水相と気相間の相互移行
(iii) ラジオリシス（水の放射線分解）反応による生成量
(iv) ラジオリシス生成種間の相互反応（別種生成）
(v) ラジオリシス生成種間の相互反応（消滅）
(vi) 水相と気相間の相互移行

表3 ラジオリシスコードの主な計算条件

BWR対象：
- 計算対象分解生成種: 11
  O_2, H_2, H_2O_2, O_2^-, HO_2^-, H^+, HO^-, e_{aq}^-, H, OH, HO_2
- 中性子、ガンマ線照射による生成(g-値: 表 4)
- 40 以上の相互反応 (表 5)
- 水相から気相への移行(実プラントのベストフィットで決定)
- H_2O_2の構造材表面での接触分解反応,水中の熱分解反応

PWR対象：
- 計算対象分解生成種にLiOHとホウ酸の成分追加
- 中性子、ガンマ線以外に$^{10}B(n,a)^7Li$反応のアルファ線のG値追加
- 水相から気相への移行項なし

わるマスバランスの基本式を**表 2** に示す[5,6]。

各流路セル内でのラジオリシス反応と流路に沿っての生成種のマスバランスを連成して解くことによって、システム全体での生成種濃度の分布を求める。ラジオリシスコードの主な特徴を**表 3** にまとめる。計算の主要定数は、ラジオリシス反応の諸定数のみでなく、原子炉炉心部、ダウンカマ部ほかの中性子束、ガンマ線線量率の分布、原子炉系全体での流速分布、気液二相流の気液比、ジェットポンプでの混合比など核熱設計で得られる設計定数など多岐にわたる。

計算上、難しいのはラジオリシス反応の解析の方である。英国ハウエル研究所（当時の名称）で、Burns らが、照射下のジルカロイの腐食解析に開発した G 値、反応定数をもとに、Risö 研究所（デンマーク）、Studsvik 研究所（スエーデン）、Chalk River 研究所（カナダ）などの高温のデータを増補して、定数セットを設定した[7-9]。ただし、オリジナルデータが同じでも、独自の核熱設計の結果に基づいて、プラント全体でのラジオリシス評価を実施するために、データのチューニング、最適化が必須となった。BWR メーカ４社（日立、東芝、GE、ABB-ATOM、いずれも 19090 年代の名称）の定数セットを**表 4** と**表 5** に示す[5, 6, 10-13]。

表4 BWR原子炉水条件でのG値 [5],[10-12]

生成種	γ線 (個/100eV)				中性子 (個/100eV)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
e^-	3.50	3.61	3.41	3.41	0.60	0.01	0.68	0.68
H	0.90	1.04	0.87	0.87	0.50	0.21	0.52	0.52
H^+	3.50	4.48	3.41	3.41	0.60	0.15	0.68	0.68
H_2	0.60	0.54	0.60	0.60	1.50	1.33	1.52	1.52
H_2O_2	0.55	0.29	0.31	0.31	1.14	0.97	1.22	1.22
HO_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
OH	4.50	5.14	4.86	4.86	1.70	0.95	1.80	1.80
OH^-	0.00	0.86	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00

表 5 原子炉水条件での反応定数 [5],[10]-[12].

	反応種項	生成種項	反応定数							
			正方向反応				逆方向反応			
			A	B	C	D	A	B	C	D
1	$E^- + H_2O$	$H + OH^-$	$2.90x10^{+2}$	$1.71x10^{+2}$	$1.90x10^{+2}$	$1.69x10^{+2}$				
2	$E^- + H^+$	H	$2.60x10^{+11}$	$3.50x10^{+11}$	$2.54x10^{+11}$	$4.11x10^{+11}$			$1.00x10^{+5}$	
3	$E^- + OH$	OH^-	$2.90x10^{+11}$	$2.13x10^{+11}$	$3.17x10^{+11}$	$3.17x10^{+11}$				
4	$E^- + H_2O_2$	$OH + OH^-$	$2.40x10^{+11}$	$1.30x10^{+11}$	$1.38x10^{+11}$	$1.48x10^{+11}$				
5	$H + H$	H_2	$9.00x10^{+10}$	$8.50x10^{+10}$	$1.06x10^{+11}$	$1.06x10^{+11}$				
6	$E^- + HO_2$	HO_2^-	$3.00x10^{+11}$	$2.13x10^{+11}$	$2.38x10^{+11}$	$2.12x10^{+11}$				
7	$E^- + O_2$	O_2^-	$2.60x10^{+11}$	$2.60x10^{+11}$	$2.01x10^{+11}$	$5.60x10^{+11}$				
8	$2E^- + 2H_2O$	$H_2 + 2OH^-$	$1.75x10^{+6}$	$2.28x10^{+7}$	$1.74x10^{+7}$	$1.73x10^{+7}$				
9	2OH	H_2O_2	$2.50x10^{+10}$	$1.70x10^{+10}$	$4.76x10^{+10}$	$2.00x10^{+10}$				$6.10x10^{-3}$
10	$OH^- + H$	$E^- + H_2O$	$7.00x10^{+8}$	$6.96x10^{+8}$	$6.88x10^{+8}$	$2.12x10^{+8}$				
11	$E^- + H + H_2O$	$OH^- + H_2$	$4.82x10^{+9}$	$5.51x10^{+9}$	$4.76x10^{+9}$	$4.76x10^{+9}$				
12	$E^- + HO_2^- + H_2O$	$OH + 2OH^-$	$5.35x10^{+8}$	$7.71x10^{+8}$	$6.67x10^{+8}$	$6.66x10^{+8}$				
13	$H + OH$	H_2O	$2.30x10^{+11}$	$5.50x10^{+11}$	$2.12x10^{+11}$	$2.12x10^{+11}$				
14	$OH + H_2$	$H + H_2O$	$1.40x10^{+9}$	$9.56x10^{+8}$	$1.27x10^{+9}$	$1.27x10^{+9}$		$2.46x10^{+2}$	$1.10x10^{+3}$	
15	$H + O_2$	HO_2	$1.50x10^{+11}$	$8.60x10^{+10}$	$2.01x10^{+11}$	$1.07x10^{+11}$				
16	$H + HO_2$	H_2O_2	$3.00x10^{+11}$	$2.13x10^{+11}$	$2.11x10^{+11}$	$2.12x10^{+11}$				
17	$H + O_2^-$	HO_2^-	$3.00x10^{+11}$	$2.13x10^{+11}$	$2.11x10^{+11}$	$2.12x10^{+11}$				
18	$E^- + O_2^- + H_2O$	$HO_2^- + OH^-$	$3.57x10^{+9}$	$9.36x10^{+9}$	$1.13x10^{+8}$	$6.19x10^{+9}$				
19	$H + H_2O^2$	$OH + H_2O$	$2.00x10^{+9}$	$2.06x10^{+9}$	$3.07x10^{+9}$	$1.12x10^{+9}$				
20	$OH + H_2O_2$	$H_2O + HO_2$	$4.20x10^{+8}$	$3.49x10^{+8}$	$3.91x10^{+8}$	$3.91x10^{+8}$				
21	$OH + HO_2$	$H_2O + O_2$	$1.00x10^{+11}$	$8.60x10^{+10}$	$1.27x10^{+11}$	$1.27x10^{+10}$				
22	$OH^- + H_2O_2$	$HO_2^- + H_2O$	$1.00x10^{+10}$	$6.27x10^{+9}$	$1.72x10^{+10}$	$3.44x10^{+9}$	$2.14x10^{+5}$	$4.09x10^{+5}$	$1.08x10^{+5}$	$1.08x10^{+5}$
23	$2HO_2$	$H_2O_2 + O_2$	$5.00x10^{+7}$	$6.29x10^{+7}$	$9.29x10^{+7}$	$3.55x10^{+7}$				
24	HO_2	$O_2^- + H^+$	$3.90x10^{+5}$	$2.74x10^{+5}$	$8.46x10^{+6}$	$6.96x10^{+6}$	$7.70x10^{+11}$	$5.33x10^{+11}$	$5.29x10^{+11}$	$5.29x10^{+11}$
25	$HO_2 + O_2^-$	$O_2 + HO_2^-$	$5.00x10^{+8}$	$5.00x10^{+9}$	$5.16x10^{+8}$	$5.16x10^{+8}$				
26	$H^+ + OH^-$	H_2O	$1.90x10^{+12}$	$1.54x10^{+12}$	$1.48x10^{+12}$	$1.52x10^{+12}$	$1.40x10^{-1}$	$1.57x10^{-1}$	$1.81x10^{-1}$	$1.32x10^{-1}$
27	$O_2^- + OH$	$OH^- + O_2$	$2.90x10^{+11}$	$8.60x10^{+10}$	$1.27x10^{+11}$	$2.72x10^{+11}$				
28	$2O_2^- + 2H_2O$	$O_2 + H_2O_2 + 2OH^-$	$1.27x10^{+5}$		$1.93x10^{+5}$	$1.93x10^{+5}$				
29	$2H_2O_2$	$2H_2O + O_2$			$2.07x10^{-1}$					
30	H_2O_2	$H^+ + HO_2^-$				$3.34x10^{-1}$				$2.12x10^{+11}$
32	$HO_2^- + OH$	$HO_2 + OH^-$				$7.93x10^{+10}$				

ラジオリシスコードでは、反応定数が大きいため、反応式が非常に硬く（stiff）、このため解が不安定で、解が激しく振動する問題があった。この課題は後退微分法（BDF 法、Backward Differential Formula）を採用することで回避し、最終的には流れにそっての線量率の大きな変動にもかかわらず安定な濃度解を得ることができた[14,15]。

ラジオリシスコードで計算された流路にそっての過酸化水素濃度の分布を**図 4** に例示する[16]。BWR では原子炉炉心および 1 次系冷却市中では 200ppb の酸素が存在することは知られていたが、過酸化水素の存在については、実際にプラントで確認されたのはラジオリシス解析が進んでからで、過酸化水素の熱分解（実際には、構造材表面での接触分解の影響のほうが大きいが）の影響で、予測はされたが実測では容易には確認されていなかったが、サンプリング方法に工夫することで、まずはその存在が明らかにされ、次に述べる腐食電位の測定で定量的な定量的にも裏づけられた。過酸化水素は分解して酸素に変わるため、実効酸素濃度（$[O_2]_{eff}=[O_2]+1/2[H_2O_2]$）は一定でも、過酸化水素の濃度は流路に沿って変化する。その結果、主として過酸化水素濃度で決まる腐食電位は、流れに沿って、すなわち場所ごとに変わるため、各機器の腐食について評価するためのラジオリシスコードの意義は大きい[16]。

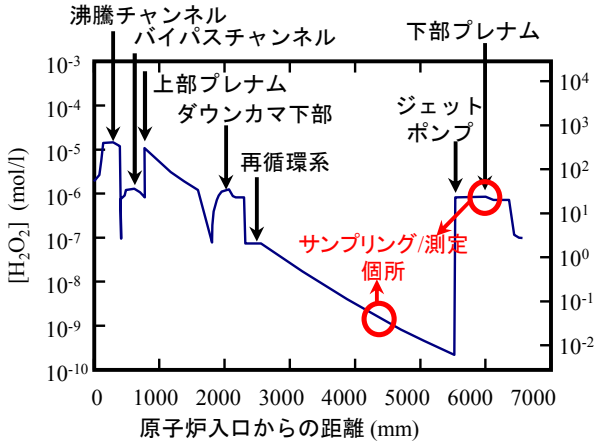
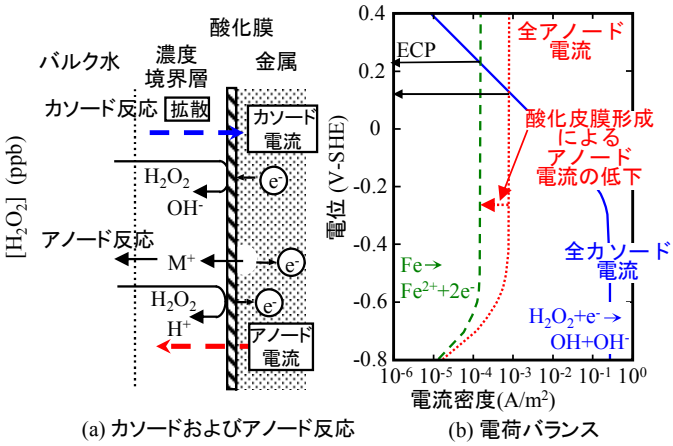


図4 流路に沿ってのH$_2$O$_2$濃度分布の計算例



(a) カソードおよびアノード反応　(b) 電荷バランス

図5 金属表面での電荷バランス

2.3 腐食環境予測

応力腐食割れ（SCC）など、腐食に係わる材料損傷に腐食環境インデックスには、腐食電位（ECP）が採用されることが多い。金属表面では、**図 5** a)に示すように、金属の溶解などによるアノード電流と酸素などの酸化種の還元反応によるカソード電流がバランスする。図５ b)に示すように、アノード電流は電位とともに増大、一方カソード電流は減少する。カソード電流は酸化種濃度が増加すると、増大する。なお、図５ b)では、カソード電流の向きを逆にして、カソードとアノード電流の交わる点では、両者が打ち消しあって、正味の電流が流れない状態を示す。この両者がバランスして正味の電流が流れない状態での電位を腐食電位と定義している[16]。これより分かるように、酸化種濃度が増大すると、カソード電流が増加して、腐食電位は増大する。腐食電位の予測では、この図 5 の電位バランスを酸化種

濃度の関数として求めるものであるが、金属表面が酸化皮膜に覆われていない場合と酸化皮膜の覆われている場合では、アノード電流が変わる。酸化皮膜が発達すると、アノード電流が減少するが、腐食電位は増大する。このため、表面の酸化皮膜の厚さを計算して、上記酸化種濃度のほかに酸化皮膜厚さのパラメータのひとつに加えることが必要となる。

図 6 に金属表面での酸化皮膜の成長を模式的に示す。アノード電流で決まる金属イオンの溶解に基づき、金属イオンの境界層からバルク水への移行、酸化物としての析出などのプロセスを数式化して、酸化皮膜の厚さを求める。酸化膜が成長すると、アノード電流が低下して、成長速度が抑制され、これらがバランスして、酸化皮膜の平衡値を求めることができる[17]。

図 5 に示した電気化学モデルと**図 6** に示した酸化皮膜の成長モデルを表 6 に示すように連成させて、時々刻々変化する腐食電位を求める[17]。

数式ほかの詳細は関連文献に譲るが、これまでに得られた代表的な腐食電位の評価結果と測定結果を**図 7** に示す。

表6　電気化学モデルと酸化皮膜成長モデルを連成させた腐食電位解析モデル

要素モデル	電気化学モデル（静的モデル）		酸化皮膜成長モデル（動的モデル）
入力	温度、pH、$[H_2O_2]$、$[O_2]$ 酸化皮膜厚さ 酸化皮膜特性	連成解析	温度、pH、質量移行係数 電流密度（i_{corr}） 腐食電位（ECP）
出力	電流密度（i_{corr}） 腐食電位（ECP）		酸化皮膜厚さ 酸化皮膜特性（マグネタイト/ヘマタイト比）

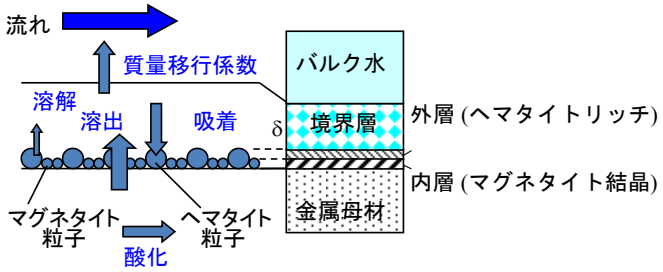


図 6　2層酸化膜モデル

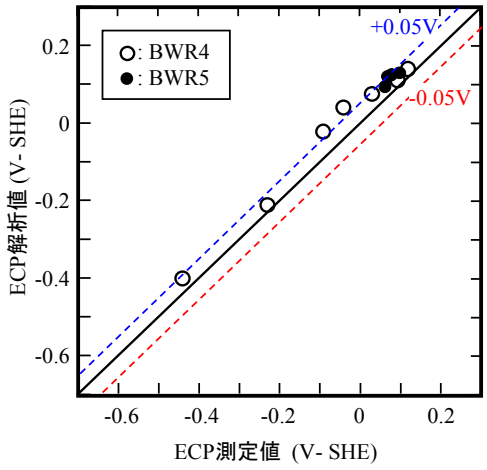


図7　腐食電位解析値とBWR実機での測定値の相関

2.4 ラジオリシスモデルと電位モデルを結合した腐食環境予測手法の V&V

先のラジオリシスモデルの結果は、測定値が原子炉水をサンプリングして測定した酸化種に限られ、V&V で結果の妥当性を評価するのに十分な測定結果を得られない。一方で、高温水中で測定される腐食電位を含めると信頼できる測定値の数も増えるため、ラジオリシスモデルと腐食電位モデルをあわせた腐食環境評価手法として、V&V を行うことが適切と考え、その評価手法を提案した[6]。

３．配管減肉予測

3.1 配管減肉の課題

PWR2次系では、1986年のSurry-2、2004年の美浜-3での給復水系配管の減肉による大規模破損が報告されている。BWRでは、1970年半ばまでに、同様の減肉事象による給水系からの鉄クラッドの発生が報告されていたが、その給水系への酸素注入の採用により、この問題は解消した。

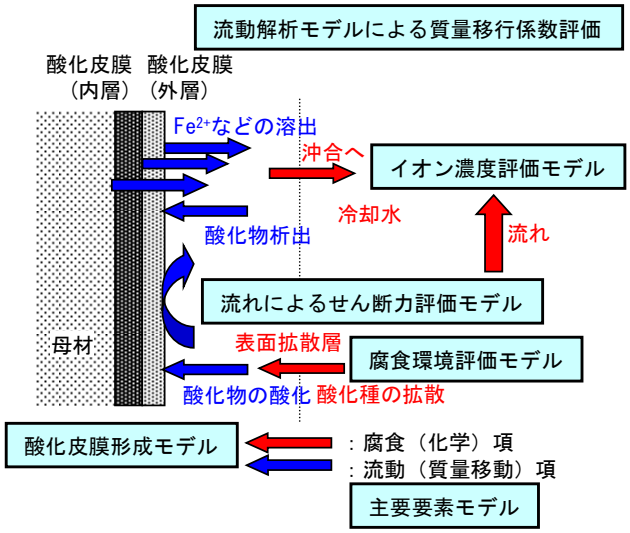


図８　流れ加速腐食評価のための要素モデル

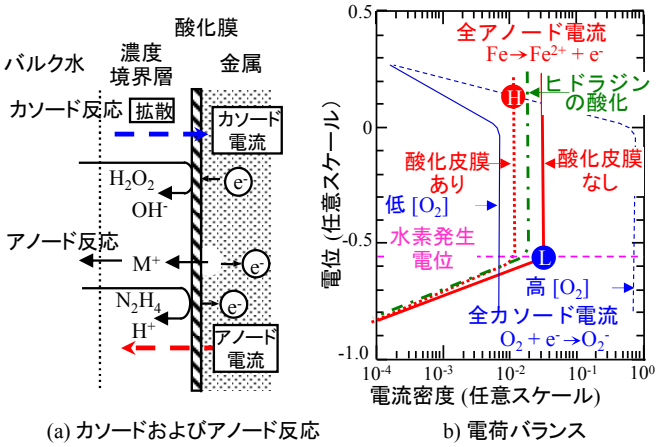


図９　金属表面での電荷バランス

図８に、流れ加速腐食の概要を示す。炭素鋼表面からは主としてFe^{2+}イオンが溶出する。溶け出したFe^{2+}イオンは境界層にいったん留まり、一部はバルク水中に拡散して消失する。一部は過飽和となって、酸化物として析出し、その一部が表面に析出して、酸化皮膜を形成する。酸化皮膜は母材を保護し、Fe^{2+}イオンの溶出を抑制する。バルク水の流速が増大すると、境界層の厚さが減少し、境界層からバルク水への拡散が助長され、Fe^{2+}イオンのバルク水への移行が増え、酸化皮膜の成長が阻害されると同時に、皮膜の溶解による皮膜の劣化も促進され、母材を保護すべき酸化皮膜が薄くなって、母材からのFe^{2+}イオンの溶出が促進され、減肉が進行する。流速が増大すると、表面のせん断応力が増大し、酸化皮膜の機械的な破壊も進行し、このプロセスも腐食の加速そして減肉へと進む要因のひとつとなる。流動加速腐食のプロセスを数学的に表現し、解析的に減肉速度を評価するためには流動因子および腐食因子を定量化することが必須となる[19]。

流れ加速型腐食においては、腐食電位評価の場合と同じく、金属表面での電化バランスで腐食速度が決まる（**図９**）。酸素濃度が PWR２次系のように十分に低い場合には、アノードとカソードの電流の交点は水素発生電位より低くなり、電位は水素発生電位となる。表面に酸化皮膜が発達すると、アノード電流は低下し腐食減肉速度は低下するが、電位そのものは水素発生電位からは逸脱できない。酸素添加により酸素濃度が増大するとともにカソード電流が増大し、同時に酸化皮膜の成長が加速し、アノード電流が低下して、腐食速度が抑制されると同時に、腐食電位が増大する。SCC においては、酸化種濃度を下げ、腐食電位を下げることで、腐食環境緩和を図っているが、流れ加速腐食においては、適度の酸素添加により、腐食電位を増大させ、保護性の酸化皮膜を発達させることで、腐食速度を抑制する。腐食電位の観点では、逆操作が必要な点に注意が必要である[20]。

流れ加速型腐食の予測には、腐食環境予測モデルの転用が可能で、図９に示した電気化学モデルと図６に示した酸化皮膜の成長モデルを表６に示すように連成させて、時々刻々変化する酸化皮膜厚さとアノード電流密度（減肉速度）を求める[20]

数式ほかの詳細は関連文献に譲るが、流れ加速型腐食による減肉速度解析ｺｰﾄﾞについては、V&V を実施し、減肉速度はファクター2 以内の精度で予測できることを示している。予測精度を示す代表的結果を**図 10** に示す[21]。

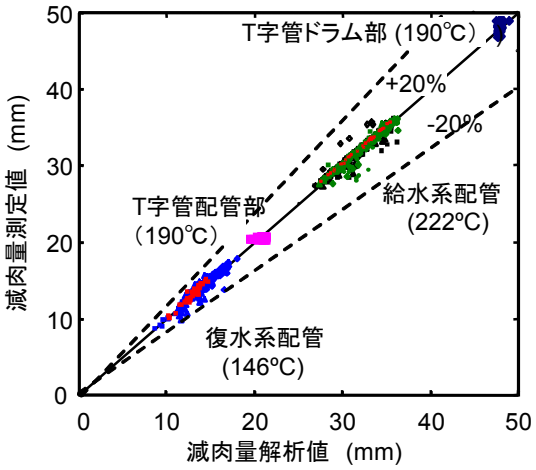


図10　配管減肉速度の予測値と実測値の相関

３．今後の展開

表１に示した様々な水化学に係わるシミュレーションについては詳細には紹介できなかったが、今後プラントの検査の合理化に関連して、様々な材料腐食に係わるシミュレーションを統合化し、余寿命の予測を一元的に評価、管理できるソフトの開発が進められている[22]。また、同様の視点で、プラント水化学の状態をオンラインで監視し、解析することで、プラントに生じつつある異常を初期の段階で検知し、問題を未然に防ぐことを意図したソフトが有益と考える[23]。この場合、プラントの知識は十分にはあるが、必ずしも計算科学技術には長けてはいない化学者が十分に使いこなせること、また時々刻々変化するプラント実績に応じて、諸定数のメンテナンスほか、ソフトの維持管理を如何に適切かつ継続的に実施することが必須の課題である。

おわりに

ラジオリシスと配管減肉の予測に関しての、水化学分野での計算科学技術について紹介してきたが、熱流動、構造解析ほかでの計算科学技術とは異なり、現象を如何にモデル化するかという点への注力が主で、如何に計算機容量を小さくし、如何に計算速度を短くするかといった、計算科学技術の醍醐味を味わうレベルにはまだ達していないように考える。今後さらに、プラントの様々な挙動を、熱水力の観点からだけではなく、化学的な挙動も含め、実際のプラントでプラント全体のシミュレーションが可能なレベルにまで高めてゆく必要があると考える。

参考文献

[1] 日本原子力学会編, “原子炉水化学ハンドブック”, (株)コロナ社（2000 年 12 月）
[2] Uchida S and Katsumura Y, “Water chemistry Technology – One of the key technologies for safe and reliable nuclear power plant operation”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 4, 346-362 (2013).

[3] Takiguchi H, Sekiguchi M, Abe A, Akamine K, Sakai M, Wada Y and Uchida S, "Evaluation of Effectiveness of Hydrogen Water Chemistry for Different Types of Boiling Water Reactors", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **36**, 179-188 (1999).
[4] Fejes PP, "Degradation Practice in Swedish BWRs", *Proc. Seminar Countermeasures for BWR Piping Cracking*, Palo Alto, CA, 1980, Electric Power Research Institute (1980).
[5] Ibe E, Uchida S, "Radiolytic Aspects in Boiling Water Reactor Primary Systems: Results from Numerical Simulation and Statistical Regression Analyses", *Nucl. Sci. Eng*. 1985, May; **89**, 330-350 (1985).
[6] Uchida S, Wada Y, Yamamoto S, Takagi J and Hisamuna K, "Verification and validation procedures of calculation codes for determining corrosive conditions in BWR primary cooling system based on water radiolysis and mixed potential models", *Nucl. Sci. Technol*, **51**, 24-36 (2014).
[7] Burns WG, et al., "The Radiation Chemistry of High temperature Water (310-400ºC) Water: Part 1: Reducing Products from Gamma radiolysis", *AERE-R9516* (1980).
[8] Christensen HC, "Fundamental Aspects of Water Coolant Radiolysis", *SKI Report 2006:16*, Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI), (2006).
[9] Elliott AJ, "Rate Constants and G-Values for the Simulation of the Radiolysis of Light Water over the range 0-300 ºC", *AECL-11037 COG-94-167*, Atomic Energy of Canada, Limited (AECL), (1993).
[10] Ichikawa N, Hemmi H, Takagi J, [Precise Evaluation of Corrosion Environments of Structural Materials under Complex Water Flow Condition, (I) Estimation of Corrosion Potentials in Reactor Pressure Vessel Bottom of BWRs]. *Nucl. Sci. Tecchnol*. **40** 583-590 (2003).
[11] Ruiz CP, Lin CC, Robinson R, Burns RW, Henshaw J, Pathania R. "Model calculation of water radiolysis and electrochemical potentials in BWR primary coolant, II". *Proc. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 6*; 1986 Oct. 13-17; Bournemouth (UK), British Nuclear Energy Society, London, UK (1986).
[12] Lundgren K, Christensen H. Model calculation of water radiolysis in the primary coolant circuit of Barseback-1 BWR. *Proc. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems* 6; 1996 Oct. 13-17; Bournemouth (UK), British Nuclear Energy Society, London, UK (1996).
[13] Yeh TK, Chu F, [Electrochemical Corrosion Potential Modeling in the Primary Heat Transport Circuit of the Chinshan Boiling Water Reactor under the Condition of Hydrogen Water Chemistry with Noble Metal Coating]. *Nucl. Sci. Technol*. **39** 1063-1074 (2000).
[14] 伊部英史、"沸騰水型原子炉における構造材に腐食環境に関する研究"、*大阪大学博士論文*（昭和 59 年）.
[15] Gear CW, The Automatic Integration of Stiff Ordinary Differential Equations", *Information Proceeding*, 68, 187-193 (1969).
[16] Wada Y, Watanabe A, Tachibana M, Uetake N, Uchida S and Ishigure K, "Effects of Hydrogen Peroxide on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water, (III) Crack Growth Rates in Corrosive Environment Determined by Hydrogen Peroxide", *J. Nucl. Sci. Technol*., **37** (10), 901-912 (2000).
[17] Macdonald DD, "Calculation of corrosion potentials in boiling water.", *Proc. 5th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*; 1991 Aug 25-29, Monterey, CA. La Grange Park (IL): American Nuclear Society; 935-940 (1992).
[18] Uchida S, Hanawa S, Naitoh M, Okada H and Lister DH, "An empirical model for the corrosion pf stainless steel in BWR primary coolant", *Corrosion Engineering Science and Technology,* **52**, 5, 587-595 (2017).
[19] (社)日本機械学会減肉特別対応タスク技術サブタスク 技術検討 WG, "配管減肉に関する技術的知見（合本版）", (社)日本機械学会（平成 22 年 6 月）.
[20] Uchida S, Naitoh M, Uehara Y, Okada H, Ohira T, Takiguchi H, Sigino W and Koshizuka S, " Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (IV), Comparison of Wall Thinning Rates Calculated with the Coupled Model of Static Electrochemical Analysis and Dynamic Double Oxide Layer Analysis and Their Values Measured at a PWR plant", *J. Nucl. Sci. Technol*., **47** [2], 184-196 (2010).
[21] Uchida S, Naitoh M, Okada H, Ohira T, Koshizuka S and Lister DH, "Verification and Validation of Evaluation Procedures for Local Wall Thinning due to Flow Accelerated Corrosion and Liquid Droplet Impingement", *Nucl. Technol*., **178** (3) 280 (2012).
[22] Uchida S, Okada H, Naitoh M, Kojima M, Kikura H and Lister DH, "Improvement of plant reliability based on combination of prediction and inspection of wall thinning due to FAC", *Nucl. Eng. Design*, **337**, 84-95 (2018).
[23] Asakura Y, Nagase M, Uchida s and Ohsumi K, "Structural Material Anomaly Detection System Using Water Chemistry Data", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **29**, 1120-1126 (1992).

30号特集記事

「計算科学技術部会のこれからを担う皆さんへ」

ＭＨＩﾆｭｰｸﾘｱｼｽﾃﾑｽﾞ・ｿﾘｭｰｼｮﾝｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ㈱

佐治悦郎

（初代　編集・出版小委員長）

このたびは、ニュースレターの発行が第３０号の節目を迎えられたとのこと、まことにおめでとうございます。先日、出版・編集小委員会委員長の田中正暁さんから、３０号記念として寄稿のご依頼をいただき、「あぁ～、そういえば」と、久しぶりに自分が同小委員会の初代委員長を仰せつかったことを懐かしく思い出しました。私から数えて田中さんで6代目になるとのことです。

当時（２００２年）の私は内閣府原子力安全委員会事務局という役所に所属し、凡そ学会活動に自由に時間を避けるとは言い難い環境で仕事をしていましたので、なぜ私がこの役目を引き受けることになったのか、今から思い返すとやや腑に落ちない部分もあるのですが、ともかく、引き受けたからには小委員会の最低限の仕事として、部会員に向け情報共有/発信のための簡単な情報誌のようなものを発行せねばならないと考えたのでしょう。発足時の小委員会メンバーは３名でしたが、集まって相談する時間の余裕もなく、まずは私がたたき台を作って他のメンバーにメールで送り、レビューいただいてコメントをもらうというプロセスをとったように思います。そうして出来上がったのがニュースレター創刊号です。ちなみに、「ニュースレター」という名称は、米国原子力学会のある部会の情報誌をなぞったものと思われます（と他人事のようにいうのは、当時の経緯がまったく記憶にないからです）。ただ、創刊号はニュースレターというにはページが多過ぎてクレームをいただいた、なんていうこともありました（第２号の編集後記をご覧ください）。

私が関わったのは、創刊号と第２号のみで、その後は山口先生（当時はまだ、サイクル機構の山口さん、笑）にバトンタッチしました。今回、すべての号をざっと通して拝見し、改めて歴代小委員会の皆さんが積み上げてこられた努力の成果に触れることができました。この場を借りて、敬意を表したいと存じます。一方で、表紙をはじめ、その大まかな構成が第２号から大きくは変わっていないことを知り、少しうれしくもありました。

さて、昔話はこれくらいにして、せっかくいただいた機会ですので、本部会のこれからを担う皆さんへ、私の個人的な思いをお伝えしたいと思います。（いろいろなところで切り口は変えつつも同じようなことをお話ししてきているので、どこかで聞いたなと思われた方には申し訳ありません）

● 計算科学技術部会の持つユニークな性格

原子力学会には全部で１９の部会があります。「技術」を中心テーマに据えない「社会・環境部会」を除くと、当部会以外の１７部会はすべて特定の専門技術分野や目的・対象物に対する技術が部会の活動テーマとなっています。然るに、当部会は特定の専門分野や目的・対象物を限定しない、いわばすべての部会に横串をさせる部会であります。計算機や計算技術の発達に従って、ある特定の専門技術分野にとどまらないモデリング＆シミュレーションが急速に発達しつつある現在、当部会の重要性も同様に増していると考えます。多くの部会員の皆さんはそれぞれに専門または得意分野をお持ちと思いますが、その枠を超え共同でマルチ・フィジックスのシミュレーションモデルを構築する、かっこうの場所をこの部会は提供してくれるのではないでしょうか。これからは一人ひとりの専門分野を飛び超えて、部会員の皆さんの様々な専門知と力を合わせ、ぜひとも「大きな絵」を描いていただきたいと思います。

● 計算結果の信頼性、不確かさの定量化とその限界

計算機や計算科学技術の発達により、物理現象や対象物を正確にモデル化しシミュレーションするレベルがどんどん向上していくこととなりますが、計算が精緻であればあるほど、結果の信頼性がどの程度のものなのか？に関心が高まります。そして、精緻であるが故に、どこに不確かさが残っているかがより明示的になり、それを特定し計算結果が有する不確かさを定量化する技術も高度化していくこととなります。部会員の皆さんに対して、「釈迦に説法」のようなことを書いていますが、私たちが扱う原子力という分野においては、様々な意思決定に際して用いられる計算結果の不確かさの意味合いが社会的に大きな影響を及ぼすことがあり、ちょっと厄介です。

我が国の原子力が抱える最も重い課題は、社会からの信頼の獲得、そこに立ちはだかるハードルは一般市民が抱く「安全性への懸念」です。しかし、いったい「どれくらい安全なら安全といえるのか？」(How safe is safe enough?) という、いわゆる「安全目標」の議論が我が国では成熟しているとはいえません。今後、定量的安全目標の議論が進展していくなかで、計算結果の不確かさの「見える化」が一層必要とされることとなるでしょう。難しいテーマですが、それだけに取り組み甲斐もあると思います。

一方では、その限界についても率直に認める必要があるでしょう。炉物理の教科書[1]で有名なワインバーグ博士が提唱した Trans-Science という概念[2]を皆さんはご存知でしょうか。「科学の問題として問うことはできるが、科学によって答えることができない問題」（“…questions which can be asked of science and yet which cannot be answered by science.”）の存在を Trans-Science という言葉で定義されました。博士は具体的な例として、生物への低線量放射線影響やほとんど起こりそうもない事象、たとえば破局的な原子

[1] Alvin M. Weinberg and Eugene P. Wigner, *The Physical Theory of Neutron Chain Reactors,* The University of Chicago Press (1958).

[2] Alvin M. Weinberg, “Science and Trans-Science,” *Minerva,* **10**, 209-222 (1972).

炉事故や巨大地震を挙げています。科学技術の進展とともにその対象は変化するでしょうが、存在自体がなくなることはありません。博士は科学者の責任として、”to make clear where science ends and trans-science begins”が決定的に重要であると主張しており、それは福島第一（１F）事故を経て、ますます重みを増しているように思います。計算結果の不確かさについても、社会や政治の要求に安易におもねることなく、「ここから先は分からない」（＝科学的根拠に基づく客観的判断の領域から価値判断の領域に移っていく）と信念をもって伝えることもまた重要であると考えます。

● ＡＩによるイノベーションへの期待

手垢にまみれたありきたりな言葉であることは承知の上です。しかし、世界中でみられる進歩、発展を目の当たりにし、どうしても言わずにはいられません。AI は今まで何度かブームになっては消え去っていった歴史がありますが、どうやら今回は本物のようです。原子力においても様々な分野でも応用が期待されます。しかしながら、といっては失礼かもしれませんし、単に私が認識不足なだけなのかもしれないのですが、本部会関連で報告されている研究成果は、昔から AI との相性が良いとみられていた炉心核設計における燃料装荷パターン探索に関する研究等一部を除き、圧倒的にモデリング＆シミュレーションの分野で占められているようにみえるのです。でも、実際には原子力利用のいろいろな現場で、AI の適用に関する研究開発や実用化が静かに進行しているのではないでしょうか。そうした事例を収集し、部会員間で情報共有することにより、相互啓発を図り、以って原子力分野におけるイノベーションを促進するといった活動が本部会主導でなされることを大いに期待したいと思います。

初代部会長の矢川先生は、ニュースレター創刊号の巻頭言で、厳しい価格競争にさらされることのなかった我が国の原子力（発電事業）は、「どちらかといえば基準に基づく設計に終始してきた」結果、「次第にコンピュータによる武装を緩める方向にむかった」のではないか、と指摘しておられます。つまり、このことはとりもなおさず、これからの自由競争下での原子力において、再び、最先端の計算科学技術を有力な武器として活用するニーズが高まっていることを意味するのではないでしょうか。

一方で、「基準に基づく設計」は依然として大きな支配力を有しています。「基準」とは具体的には、国の規制要求であり、規制にエンドースされた民間規格であり、さらには規制に容認されデファクト・スタンダード化したものなどを指すと考えられますが、いずれも最新の科学技術を反映する際の障害となり得ます。そして、そうした状況は、１F 事故を経験し、規制組織や規制基準が大きく変わった今も本質的には変わっていないように思います。変革のためには、規制側、被規制側双方の努力が必要です。

エネルギー政策論の第一人者であった故・澤昭裕氏（元国際環境経済研究所所長）は、「原子力を殺

すのは、原子力ムラ自身である」[3]と喝破され、原子力界の自覚と変革を促しておられます。「原子力には第一級の技術人材が集まってきたはずだ。しかし、『国策民営』の庇護の下、『敷かれたレール』を無批判に進んできた面はなかったか。我が国は（中略）まったく新たな地平を切り開くような革新的成果は生み出せていないのだ。」との澤氏の批判は、上述の矢川先生のご指摘とも相通じるものがあるように思います。我が国の原子力の再生を考えるとき、もはや従来の安住の地への帰還は許されないのではないでしょうか。原子力界の変革に、たとえば本稿で述べてきたようなアプローチで計算科学技術が貢献できることは間違いなく、皆さんの奮起を切に願う次第です。

（7 月 30 日　記）

紙面を少し頂戴しまして。

多くの方々のご協力、ご尽力により、30 号を迎える記念として、節目となる記事を掲載することはできないかと考え、創刊号からニュースレターを眺め直していたところ。ニュースレターの立ち上げのご苦労を若い世代へのエールにかえてご寄稿いただけないかと思い、佐治様にお願い申し上げた次第です。是非、多くの方にお読み頂けますこと、切に願っております。

ここに、ご快諾、ご寄稿頂きました佐治様に深く感謝の意を表したいと存じます。

（出版・編集小委員長　田中　正暁）

[3] 澤昭裕、「戦略なき脱原発へ漂流する日本の未来を憂う」、Wedge２０１６年３月号、http://wedge.ismedia.jp/articles/-/6464

講習会・ワークショップ等の開催報告・連絡事項等

● SNA+MC 2020, Japan

Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2020

Tokyo Metropolitan Area (Chiba), Makuhari, Japan, 18-22 May 2020

[Main Topics]

・Computational Nuclear Applications

・High Performance Computing & Visualization

・Monte Carlo Simulation for Radiation Transport

[Special Topics]

・Fukushima Recovery & Decommissioning Issues

・Virtual Reactor & Virtual ADS

・AI Technology for the Nuclear Field

・Monte Carlo Simulation for Medical and Life Science

[Proceedings]

Selected manuscripts will be published in a special edition of an international journal (details in forthcoming announcements)

[Key Dates]

・Call for Abstracts: April 2019

・Deadline for Abstract Submissions: June 2019

・Notification of Acceptance: October 2019

・Deadline for Early Registration: January 2020

[Contact]

・email: sna_mc2020secret@csed.sakura.ne.jp

・web: http://snamc2020.jpn.org/

● 協賛会議

Fifteenth International Conference on Flow Dynamics

「第 15 回流動ダイナミクスに関する国際会議」

本会議は熱流動に関する国内外の研究者が集まり、研究者や学生が研究発表を通じて学術交流

を行うもので、今年で 15 回目を迎えます。多くの方々のご講演及びご参加をお待ちしております。

日　時：　2018 年 11 月 7 日（水）～11 月 9 日（金）
会　場：　仙台国際センター
詳細・申し込み：　http://www.ifs.tohoku.ac.jp/icfd2018/
問い合わせ先：　流体科学研究所 ICFD 事務局
TEL&FAX：022-217-5301
E-mail：icfd2018@fmail.ifs.tohoku.ac.jp

● 日本原子力学会　計算科学技術部会 懇親会のご案内

日本原子力学会　計算科学技術部会では、部会員の親睦をはかるため、下記の通り懇親会を開催致します。是非お誘いあわせの上、ご参加くださいますようお願い申し上げます。

日　　時：2018 年 9 月 6 日（木）19:30～
場　　所：個室居酒屋 丸屋 岡山駅前本店
岡山県岡山市北区本町 8-1 田中ビル 1F
Tel: 050-3466-2607
HP: https://r.gnavi.co.jp/y245903/
アクセス：岡山駅から徒歩 5 分
会　　費：5,000 円

ご参加いただける方は
・ご所属
・お名前
・お電話番号
を以下の宛先までお知らせください。
【8 月 27 日（月）】までにお願い致します。
当日の急な変更等があった場合に連絡を取る場合がございますので、ご出席いただける方は懇親会当日に連絡の取れる電話番号をお知らせいただけますと幸甚です。
宛先：日本原子力研究開発機構　宮村　浩子（miyamura.hiroko@jaea.go.jp）

年　間　予　定

2018 年

５月　　第１回運営小委員会

８月　　第２回運営小委員会

９月　　秋の大会（全体会議：9 月 7 日（金）　12:00～13:00　H 会場）

会期：　2018 年 9 月 5 日（水）～7 日（金）

会場：　岡山大学（岡山市）

１１月　「第 15 回流動ダイナミクスに関する国際会議」

（Fifteenth International Conference on Flow Dynamics）

会期：　2018 年 11 月 7 日（水）～11 月 9 日（金）

会場：　仙台国際センター

2019 年

１月　　第３回運営小委員会

３月　　第４回運営小委員会

３月　　春の年会（全体会議）

会期：　2019 年 3 月 20 日（水）～22 日（金）

会場：　茨城大学（水戸キャンパス）

＜編集後記＞

日本原子力学会　計算科学技術部会　ニュースレター　第 30 号
2018 年 8 月

編集・発行責任：　計算科学技術部会　出版・編集小委員会
田中　正暁　（委員長）
（原子力機構、tanaka.masaaki@jaea.go.jp）
田村　明紀
（日立製作所、akinori.tamura.mt@hitachi.com）
村上　貴裕
（電中研、murakami@criepi.denken.or.jp）
山下　晋
（原子力機構、yamashita.susumu@jaea.go.jp）
酒井　幹夫
（東京大学、mikio_sakai@n.t.u-tokyo.ac.jp）

ニュースレター30 号をお届け致します。既に皆様御存じかもしれませんが、今年度の計算科学技術部会の役員・委員を本レターでも御紹介させて頂いております。多くの方が留任もしくは少しお立場を変えての御就任となっておりますが、新たに部会運営に御参加される方々、これまで役員・委員として御尽力頂いた方々の本部会への多大な御貢献に対して、一部会員として感謝と敬意を表させて頂きたいと思います。また、昨年度　部会長を務めて頂きました巽雅洋氏に変わり、今期より伊藤啓氏が部会長に御就任されました。我々も新部会長の下、皆様の役立てる情報を発信できるよう頑張っていきたいと思いますので、部会員の皆様におきましても引き続き御支援・御協力の程お願い致します。

（山下　晋）

※出版・編集小委員会からのお知らせ

過去のニュースレターは以下の計算科学技術部会ホームページからダウンロードできます。

http://csed.sakura.ne.jp/archives/category/2_newsletter