改訂 原子炉水化学ハンドブック

日本原子力学会 水化学部会 【編】

コ ロ ナ 社

日本原子力学会 水化学部会
原子炉水化学ハンドブック改訂ワーキンググループ

主　査	室　屋　裕　佐	【大阪大学】基礎編分科会
幹　事	杉　野　　亘	【日本原子力発電株式会社】BWR 分科会，PWR 分科会
委　員 (五十音順)	赤　峰　浩　司	【関西電力株式会社】PWR 分科会
	阿　部　博　志	【東北大学】基礎編分科会
	内　田　俊　介	【元 東北大学】
	河　村　浩　孝	【一般財団法人電力中央研究所】基礎編分科会*
	込　山　有　人	【東京電力ホールディングス株式会社】BWR 分科会
	荘　田　泰　彦	【三菱重工業株式会社】PWR 分科会*
	高　木　純　一	【東芝エネルギーシステムズ株式会社】基礎編分科会，BWR 分科会
	長　瀬　　誠	【日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社】BWR 分科会*
	塙　　悟　史	【国立研究開発法人日本原子力研究開発機構】基礎編分科会
	久　宗　健　志	【世界原子力発電事業者協会】

（*：各分科会のリーダー）

（所属は 2022 年 3 月現在）

改訂版まえがき

「原子炉水化学ハンドブック」の初版は，2000 年 12 月に出版された。現・水化学部会の前身である水化学研究専門委員会の下に設置されたハンドブック編纂委員会（委員長：石榑顯吉東京大学名誉教授）が中心となり，産官学から 70 名を超える専門家が編纂に関わられた。当専門委員会の発足（1982 年）から約 20 年にわたる活動の集大成であり，日本および世界の原子炉水化学分野に関する知識と経験を網羅した原子炉水化学のバイブルといえる一冊である。

初版発行からさらに約 20 年が経過したが，その間，原子力を取り巻く情勢は実に波乱万丈であった。2000 年代初頭は国内外の事故の影響により逆境の時代にあったが，数年後には欧米を中心とした原子力の再評価が進み，原子力ルネッサンスとも謳われた。それも束の間，2011 年の東日本大震災における原子力事故で再び厳しい世論に晒されることとなる。しかしそれでも，その後の世界的な気候変動対策として省エネ化や低炭素化などの要求が高まってくると，再び各国で原子力を持続的に活用すべきエネルギー源として位置付ける動きに転じている。

これまで原子炉水化学は，原子力全体の安全性および信頼性確保にかかる軽水炉利用の高度化（炉出力向上），燃料の高度化，プラントの高経年化対策といった諸課題にあまねく貢献すべく，冷却水に起因する課題（燃料や構造材料の健全性の維持・向上，線量率低減，廃棄物低減など）に盛んに取り組み，BWR や PWR において，例えば貴金属注入，光触媒注入，高 pH 運転をはじめとして高度かつ多様な技術を築き上げてきた。その一方で，福島第一原子力発電所の事故に伴う，国内プラントの長期停止，汚染滞留水処理，廃止措置の加速といった，かつて経験することのなかった事象に対しても水化学は重要な役割を担うこととなった。その結果，既往の水化学分野の発展のみならず，新たなベクトルの水化学分野も確立されるに至った。

このように，水化学技術が年々高度化・多様化しつつ活躍の場を拡げていく一方で，それらを今後支えていく次世代の人材育成は喫緊の課題である。世代交代に伴う技術や経験の継承は，すでに平成初期からその重要性が指摘され，中長期的に堅実に進めるべき課題であることも広く認識されているが，それに取り組む環境は必ずしも楽観できるものではない。特に東日本大震災以降，多くのプラントが停止を余儀なくされ，現場における技術伝承の機会が大きく失われたまま 10 年以上が経過するというきわめて深刻な事態が続いている。さらに，（原子力界に限らない話ではあるが）近年の新型コロナウイルスの大流行により特に対面式の活動が大きく制限されたことも，産官学全体における人材育成のアクティビティ低下に拍車をかける要因となっている。

以上のような背景から，水化学部会では，今後の多くの技術者・研究者に役立てていただけるような情報基盤を改めて整備することが必要不可欠であると考えた。

「原子炉水化学ハンドブック」は初版発行から約20年が経過したこともあり，徐々に古い情報が散見されるようになってきたことから，これを機に記載内容をすべて見直しつつ最新の情報も網羅した改訂版の発行を計画・実施することとなった。本書は，初版と同じく「基礎編」と「応用編」から構成される。基礎編では関連する幅広い分野の基礎的事項を取り扱うが，基礎研究も日進月歩であり，初版において古い知見と判断されるものはすべて最新の知見へ更新した。それに加えて近年，水化学部会を中心として核分裂生成物の挙動に関する研究も進められ（「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会。主査：勝村庸介東京大学名誉教授），事故時の水化学にも深く関わる内容であることから，これに関する基礎事項を新たな章にまとめることとした。応用編では，プラントの構成や機器の概要，水化学の考え方や手法，運転実績などについて解説しているが，この約20年間に達成された多くの技術進展や運転実績に関する最新の情報もふんだんに盛り込んだ。さらに，福島第一原子力発電所の事故を受けて，炉内・炉外の腐食対策や汚染滞留水処理といった事故時・廃炉時にかかわる新たな水化学技術も構築されているため，これに関する章も新たに追加した。

本書は，現時点における水化学分野の全体を俯瞰しつつ最新の知識や経験を集大成したものであり，水化学分野のみならず多くの関連分野の技術者や研究者の方々に幅広く利用いただけることを強く期待する。特に，今後の水化学を支えていく若手の技術者・研究者の方々にとって本書がその一助となればまことに幸いである。

最後に，原稿の改訂・執筆に御協力いただいた多くの専門家の方々，および編集に当たり多大なるサポートをいただいたコロナ社の方々に深く感謝の意を表する。

2022年7月

一般社団法人日本原子力学会 水化学部会
原子炉水化学ハンドブック改訂ワーキンググループ
主査　室　屋　裕　佐

初版まえがき

わが国における軽水炉による原子力発電は，1970 年に敦賀 1 号機の運転が開始されて以来着実な進展を遂げ，2000 年 7 月現在で，BWR 28 基および PWR 23 基のプラントが運転されており，その総発電量は全電力量の約 37％に及んでいる。過去 30 年にわたる原子力発電プラントの運転経験は，原子炉冷却系の水化学管理が発電プラントの安全性と信頼性を確保するうえできわめて重要な技術であることを示してきた。

運転経験の浅い 1970 年代に軽水炉プラントはステンレス鋼配管の応力腐食割れ，蒸気発生器伝熱管の腐食トラブルや機器・配管の線量率の増大など，水環境と材料の相互作用に関わるいくつかのトラブルを経験した。このトラブルの発生が契機となって，水化学の研究開発が開始され，その後大きく発展し，今日に至っている。このようにわが国における水化学技術は，プラントにおいて発生したトラブルを解決するためのトラブルシューティング技術として出発したが，その後関係者の精力的な努力により初期のトラブルの解決が図られたばかりでなく，技術の高度化が進められ，被ばく線量の低減などの面で世界のトップクラスの実績を達成するに至り，国際的にも高く評価されている。

当初プラントにおけるトラブル解決のための技術であった時期において，水化学技術は同形のプラントが同一の技術を採用するという，画一的で統一的なものであった。しかしトラブルの解決が一段落すると，同じ炉形でもプラントごとに異なった水化学挙動を示す傾向がしだいに顕著になり，この対応策や現象の理解が求められることとなった。一方，活発な研究開発が進められた結果，水化学技術は高度化されると同時に多様化し，数多くの手法が技術選択肢として提案され，用意されるに至っている。このような状況にあっては，プラントごとの特徴に配慮して，複数の選択肢の中から最適化された技術を選び，これを組み合わせて使用していくことが求められる。さらに，近年運転年数の増大したプラントが増え，プラントの高経年化対策が重要な課題であるが，水化学技術においても，将来おこるかもしれない事象を予測して，これにあらかじめ対処する予防保全的な技術が重要となっている。

これまで述べてきた経緯のなかで，日本原子力学会は，産官学が連携して水化学技術の発展を図るため，水化学研究専門委員会を 1982 年に発足させ，それ以降今日に至るまで 20 年近くにわたって，活発な活動を続けてきた。同研究専門委員会は，関連する技術と基礎的な事項について調査・研究を実施するばかりでなく，水化学の国際会議や国際セミナー，ワークショップなどをわが国で開催するほか，1 期 4 年の活動期間ごとに，活動の成果を取りまとめた成果報告書の刊行を行ってきた。しかし各期ごとの成果報告書では，内容が断片的になりやすく，全体を展望できるものを求める声もあった。

原子力界の他の分野と同じように，水化学においても今や世代交代の時期を迎えている。初期に現場で大変苦労された世代の専門家がしだいに一線を退かれる時期に当たっており，この貴重な経験を次の若い世代に継承していくことが急務となってきた。また，すでに述べたように，水化学技術は近年著しく高度化し多様化した結果，全体として大変複雑でわかりにくいものとなっている。水化学は燃料や材料の健全性の確保とも密接にかかわる技術であるから，技術の内容が関連する他分野の専門家にも正しく理解されることが必要である。

水化学研究専門委員会（当時は水化学高度化研究専門委員会）は，このような状況に鑑み，原子炉水化学ハンドブックを出版することを決定し，ハンドブック編纂委員会を設置して，その内容について長期間にわたり討議を重ねてきた。この結果に基づいて，多くの専門家に原稿の執筆を依頼し，その内容の吟味を繰り返して，ここに出版に至ることができた。

本ハンドブックは水化学研究専門委員会の過去20年近くに及ぶ活動の成果の総決算ともいうべき内容のものであり，基礎編と応用編の2編から構成されている。基礎編では関連する幅広い分野の基礎的事項につき，必要なデータを網羅して解説している。応用編はプラントの構成や機器の概要，水化学における運転経験，考え方や手法について解説したものである。いずれも，なるべく大勢の方に読んでいただけるよう，極力わかりやすい内容とすることを心掛けたつもりである。

これまでに述べてきたことから理解いただけるように，本ハンドブックは，原子炉水化学の分野における今日までのわが国のみならず世界の知識と経験を，基礎データも含めて集大成したもので，水化学の専門家ばかりでなく，関連する他分野の専門家，さらにはより広く一般の技術者，研究者にも，大いに役立つものと自負しており，座右の書として利用していただくことを期待している。

最後に，ボランティアとして原稿を執筆いただいた方々および編集をお願いしたコロナ社の方々に，心から感謝の意を表したい。

2000年10月

原子炉水化学ハンドブック編纂委員会
委員長　石　榑　顯　吉

改訂版執筆者一覧（五十音順）

青井洋美〔東芝エネルギーシステムズ株式会社〕10.1.1～10.1.4，10.2.1
赤峰浩司〔関西電力株式会社〕1.10.3，7.5.2～7.5.5
浅野　隆〔日立GEニュークリア・エナジー株式会社〕11.3.4(2)，11.3.5
旭　義文〔日機装株式会社〕7.6.2
阿部博志〔東北大学〕1.2，3.1.2
井門賢一〔四国電力株式会社〕6.8，7.6.3
石原伸夫〔三菱重工業株式会社〕1.1，1.3，1.7
伊藤智章〔オルガノ株式会社〕1.6
内田俊介〔元 東北大学〕1.8，2章，4章，9章
大鹿浩功〔四国電力株式会社〕6.8，7.6.3
大橋伸一〔オルガノ株式会社〕1.6，7.6.1，8.8
岡部武利〔三菱重工業株式会社〕7.4.1
鬼塚博徳〔三菱重工業株式会社〕10.1.3，10.2.1
勝村庸介〔元 東京大学〕1.9
河村浩孝〔一般財団法人電力中央研究所〕1.1，1.3，1.5，1.7
木戸俊哉〔MHI原子力研究開発株式会社〕6.5.2
越水正典〔東北大学〕1.10.1，1.10.2
小松祐哉〔東京電力ホールディングス株式会社〕8.9.1，8.9.2
齋藤宜久〔元 株式会社東芝〕1.3
榊原洋平〔株式会社IHI〕3.1
佐藤賢二〔三菱重工業株式会社〕6.4.2，7.4.1，7.4.3，7.4.5
佐藤智徳〔国立研究開発法人日本原子力研究開発機構〕1.4
島田太郎〔日本原子力発電株式会社〕8.5.1，8.5.2
菅原　優〔東北大学〕1.5
杉野　亘〔日本原子力発電株式会社〕1.7，6.9，7.7
鈴木純一〔東京電力ホールディングス株式会社〕8.9.3～8.9.5
荘田泰彦〔三菱重工業株式会社〕1.7，5.1.2，5.2.1，5.3.1，7.1～7.3，7.4.1，7.4.3～7.4.5，7.5.1
高木純一〔東芝エネルギーシステムズ株式会社〕8.1，8.2，8.4，8.7，11.3.3，11.3.3(3)，11.3.4(1)，11.4
髙須賀　仁〔四国電力株式会社〕6.8，7.6.3
竹田貴代子〔日本製鉄株式会社〕3.2
多田英司〔東京工業大学〕1.5
橋　正彦〔日立GEニュークリア・エナジー株式会社〕1.5，1.7
辻　利秀〔元 名古屋大学〕1.4
鶴田孝雄〔三菱重工業株式会社〕6.4，7.4.1，7.4.3
手塚稔也〔北海道電力株式会社〕6.7.2～6.7.4
長瀬　誠〔日立GEニュークリア・エナジー株式会社〕5.1.1，5.1.3，5.3.2，8.3，8.4.2(6)，8.4.3，8.6，8.10，10.1.1～10.1.5，10.1.8，10.2.1
西村孝夫〔三菱重工業株式会社〕1.7，5.3.1，6.3.2，6.6.1，6.6.3，6.6.4，6.7.7，10.1.5，10.2.1

端　邦　樹〔国立研究開発法人日本原子力研究開発機構〕1.10.1，1.10.2
塙　悟　史〔国立研究開発法人日本原子力研究開発機構〕1.1，1.4，2章
春　名　匠〔関西大学〕1.5
深　谷　祐　一〔東京電力ホールディングス株式会社〕11.2
宮　澤　晃〔東京電力ホールディングス株式会社〕1.10.3
村　田　和　豊〔三菱重工業株式会社〕7.4.2，7.4.4
室　屋　裕　佐〔大阪大学〕1.1，1.3，1.9.1，1.9.2
山　上　勝　彦〔三菱重工業株式会社〕7.2，7.4.1，7.4.5
山　根　正　嗣〔東京電力ホールディングス株式会社〕11.1，11.3.1，11.3.2，11.3.3，11.3.3(1)，11.3.3(2)
渡　邉　豊〔東北大学〕1.2

（所属は 2022 年 3 月現在）

初版執筆者一覧（五十音順）

朝倉大和〔株式会社日立製作所〕1.10.1
穴田博之〔住友金属工業株式会社〕3.2.3
安部勝洋〔神鋼特殊鋼管株式会社〕9.2
荒殿保幸〔日本原子力研究所〕1.8.4
石榑顯吉〔元 東京大学，埼玉工業大学〕1.3，1.9
石原信秋〔四国電力株式会社〕6.8
石本悟〔三菱重工業株式会社〕7.4.1
出水丈志〔株式会社荏原製作所〕1.6.3
市川長佳〔株式会社東芝〕8.4.1
伊藤智章〔オルガノ株式会社〕1.6.1，1.6.2
稲見一郎〔株式会社東芝〕8.8
岩崎誠〔中部電力株式会社〕10.2.1
内田俊介〔東北大学〕1.7.4，1.10.2，2章，8.5.4，8.9，8.10
大塚重満〔三菱重工業株式会社〕6.2
大角克巳〔株式会社日立製作所〕8.6.2
大中紀之〔日立協和エンジニアリング株式会社〕1.5.6
奥川克己〔オルガノ株式会社〕7.6.1
乙葉啓一〔日本原子力発電株式会社〕8.10
改野栄二郎〔三菱重工業株式会社〕7.3，7.4.1
笠原和男〔三菱重工業株式会社〕5.2.1，5.3.1，6.6.1，6.6.2，6.7.7
加藤俊二〔財団法人電力中央研究所〕3.1.2，3.1.3，10.1.4，10.1.6
金子正〔株式会社東芝〕8.2
北端琢也〔核燃料リサイクル機構〕8.4.2，8.4.5，9.3，9.7
木戸俊哉〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕3.2.4，6.5.2
倉品雅彦〔日機装株式会社〕7.6.2
小池正実〔九州電力株式会社〕7.7
小西隆男〔株式会社原子力安全システム研究所〕3.2.1
酒井伸〔日本原子力発電株式会社〕9.6
佐藤公隆〔株式会社日鐵テクノリサーチ〕1.7.3
佐藤義雄〔丸紅ユーティリティー・サービス株式会社〕10.1.5
柴田俊夫〔大阪大学〕1.5.1，1.5.3，1.5.5
島田祥雄〔日本ニュークリアフーエル株式会社〕3.2.3，3.2.5
荘田泰彦〔三菱重工業株式会社〕7.1，7.2，7.4.1
菅野光照〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕6.5.1
杉本克久〔東北大学〕1.5.2，3.1.1，3.1.2
須澤洋二郎〔東京電力株式会社〕8.5.1
鈴木明〔オルガノ株式会社〕1.2.8
鈴木良男〔東京電力株式会社〕5.2.2，5.3.2，10.1.7，10.2.1
高木純一〔株式会社東芝〕8.4.1，8.4.2，8.4.5
高山繁〔財団法人産業創造研究所〕10.1.4
瀧口英樹〔日本原子力発電株式会社〕6.9，8.5.3，8.5.4
立川圓造〔財団法人日本分析センター〕1.8.1
橘孝二〔東京理科大学〕1.7.1，1.7.2，1.7.4，3.1.3
辻利秀〔北陸先端科学技術大学院大学〕1.4
都筑康夫〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕6.3
鶴田孝雄〔三菱重工業株式会社〕6.4，7.4.3

土井英雄〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕6.5.4, 6.5.5
直井洋介〔核燃料サイクル機構〕10.2.1
長尾博之〔東芝エンジニアリング株式会社〕8.1, 8.6.4
長瀬　誠〔株式会社日立製作所〕8.6.3
中村年孝〔関西電力株式会社〕10.1.7, 10.2.1
中山晴雄〔元 栗田エンジニアリング株式会社〕10.1.1, 10.2.2
西澤英一〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕6.7.1
西野由高〔株式会社日立製作所〕3.2.2, 3.2.4, 8.5.1
西村孝夫〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕6.6.3
橋本和幸〔日本原子力研究所〕1.8.5
平林孝國〔日本原子力研究所〕10.1.1
平野秀朗〔財団法人電力中央研究所〕1.5.2
福田文人〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕6.1
古田照夫〔財団法人原子力発電技術機構〕6.5.3, 8.5.2
逸見幸雄〔株式会社東芝〕8.6.1
星　三千男〔日本原子力研究所〕1.8.2, 1.8.3
堀内精彦〔原子力サービスエンジニアリング株式会社〕10.1.5
前田克治〔株式会社東芝〕8.7
牧野一郎〔関西電力株式会社〕7.5
水野孝之〔元 三重大学〕1.1, 1.2.1～1.2.4, 1.2.6
村田和豊〔三菱重工業株式会社〕7.4.2
森川義武〔アイテル技術サービス株式会社〕8.3
安中秀雄〔ラドテック・コンサルタント・ヤスナカ〕10.1.2, 10.1.3
山崎健治〔株式会社東芝〕8.4.2, 8.6.4
山田英司〔北海道電力株式会社〕6.7.2～6.7.6
山中和夫〔住友金属テクノロジー株式会社〕1.5.4
横山二郎〔ニュークリア・デベロップメント株式会社〕6.6.4
和田陽一〔株式会社日立製作所〕8.4.1, 8.4.2

（所属は初版編集当時。担当箇所は改訂版に対応）

目　　次

Ⅰ. 基　礎　編

1章　水化学の基礎

1.1　高温水の基礎物性 …… 1

1.1.1　水の分子構造 …… 1
1.1.2　誘　電　率（ε）…… 2
1.1.3　解離定数（イオン積 K_w）…… 2
1.1.4　表　面　張　力 …… 3
1.1.5　気体の溶解度 …… 4
1.1.6　固体の溶解度 …… 5

1.2　超臨界水の物性と諸特性 …… 5

1.2.1　熱　　容　　量 …… 5
1.2.2　密度-温度-圧力ダイアグラム …… 6
1.2.3　誘　　電　　率 …… 6
1.2.4　解離定数（イオン積 K_w）…… 7
1.2.5　溶　解　特　性 …… 7
1.2.6　輸　送　物　性 …… 7
1.2.7　水　素　結　合 …… 8
1.2.8　超臨界水の応用 …… 9

1.3　高温水系の熱力学 …… 10

1.3.1　水溶液の熱力学 …… 10
1.3.2　高温における水溶液の熱力学 …… 13

1.4　酸化物の物性 …… 19

1.4.1　遷移金属酸化物の諸物性 …… 19
1.4.2　等　　電　　点 …… 27
1.4.3　酸化物への吸着 …… 28

1.5　電気化学の基礎 …… 29

1.5.1　電気化学の体系 …… 29
1.5.2　平衡電極電位 …… 30
1.5.3　電極反応速度 …… 35
1.5.4　分極曲線と活性態，不動態 …… 36
1.5.5　腐食電流と腐食電位 …… 37
1.5.6　電気化学測定法 …… 38

1.6　冷却水浄化技術 …… 40

1.6.1　イオン交換樹脂概説 …… 40
1.6.2　イオン交換の基礎 …… 43
1.6.3　粒子除去機構 …… 45

1.7　水質関連測定技術 …… 47

1.7.1　冷却水中の微量元素分析 …… 47
1.7.2　ガス中の微量元素分析 …… 51
1.7.3　固体中の微量元素分析と形態分析 …… 52
1.7.4　高温水の直接測定 …… 55

1.8 放射化学の基礎 …… 58
1.8.1 核の壊変 …… 58
1.8.2 天然放射性核種 …… 60
1.8.3 核反応と放射性核種の生成 …… 60
1.8.4 ホットアトム化学 …… 63
1.8.5 放射性核種の利用 …… 66
1.9 水の放射線化学 …… 67
1.9.1 水の放射線分解 …… 67
1.9.2 高温水の放射線分解 …… 71
1.10 放射能測定技術 …… 74
1.10.1 測定原理と測定器 …… 74
1.10.2 各種測定器の特徴 …… 76
1.10.3 原子力発電所での放射能測定 …… 80
引用・参考文献 …… 82

2章 原子炉における水の役割

2.1 減速材としての水 …… 87
2.1.1 減速材の役割 …… 87
2.1.2 減速材の必要条件 …… 87
2.1.3 減速材としての水の役割 …… 87
2.2 冷却材としての水 …… 87
2.2.1 冷却材の役割 …… 87
2.2.2 冷却材の必要条件 …… 88
2.2.3 冷却材としての水の役割 …… 89
2.3 遮へい材としての水 …… 90
2.3.1 遮へい材の役割 …… 90
2.3.2 遮へい材の必要条件 …… 90
2.3.3 遮へい材としての水の役割 …… 90
引用・参考文献 …… 90

3章 原子炉材料の基礎

3.1 原子炉構造材とその腐食 …… 91
3.1.1 金属の腐食反応とその抑制法 …… 91
3.1.2 不動態化金属・合金に見られる腐食損傷 …… 93
3.1.3 腐食モニタリングおよび腐食試験法 …… 97
3.2 燃料被覆材とその腐食 …… 100
3.2.1 燃料被覆材の種類と性質 …… 100
3.2.2 ジルコニウム合金の腐食反応の基礎 …… 103
3.2.3 ジルコニウム合金の腐食機構 …… 105
3.2.4 ジルコニウム合金の腐食への水質の影響 …… 107
3.2.5 腐食試験法 …… 110
引用・参考文献 …… 112

4章　核分裂生成物

4.1　核分裂生成物の生成，壊変，放射化，そして蓄積 …… 114
4.1.1　核分裂生成物の生成 …… 114
4.1.2　核分裂生成物の壊変 …… 115
4.1.3　中性子照射による核変換 …… 115
4.1.4　核分裂生成物の燃料体中の蓄積 …… 115
4.1.5　崩　壊　熱 …… 115
4.2　核分裂生成物の挙動 …… 116
4.2.1　主要な核分裂生成物の特性 …… 116
4.2.2　通常運転時の挙動 …… 116
4.2.3　温度上昇に伴う燃料体からの放出挙動 …… 117
4.2.4　燃料損傷時の挙動 …… 117
4.2.5　燃料再処理時の挙動 …… 118
4.2.6　シビアアクシデント時の挙動 …… 118
4.3　水化学と核分裂生成物の相関 …… 122
4.4　核分裂生成物と燃料デブリの相関 …… 122
引用・参考文献 …… 123

Ⅱ．応　用　編

5章　原子力発電プラントの概要

5.1　わが国の軽水炉の歴史的変遷 …… 125
5.1.1　軽水炉技術開発の歩み …… 125
5.1.2　PWR 発電所の変遷 …… 125
5.1.3　BWR 発電所の変遷 …… 127
5.2　原子炉冷却系システム …… 129
5.2.1　PWR の原子炉冷却系システム …… 129
5.2.2　BWR の原子炉冷却系システム …… 131
5.3　原子炉冷却水の概要 …… 132
5.3.1　PWR における原子炉冷却水の概要 …… 132
5.3.2　BWR における原子炉冷却水の概要 …… 133
引用・参考文献 …… 134

6章 PWR 1次冷却系の水化学管理

6.1 水化学管理の目的 …… 135
6.1.1 ホウ素濃度の管理 …… 135
6.1.2 1次系構成材料の健全性確保 …… 136
6.1.3 燃料健全性確認のためのモニタリング …… 136
6.1.4 被ばく低減のための水化学管理 …… 136
6.2 1次系の系統構成 …… 137
6.2.1 1次冷却設備 …… 137
6.2.2 化学体積制御設備 …… 137
6.2.3 余熱除去設備 …… 138
6.3 水化学管理基準 …… 138
6.3.1 設定根拠 …… 138
6.3.2 海外の水化学管理基準 …… 140
6.4 構造材健全性の確保 …… 141
6.4.1 SUS材のSCC …… 142
6.4.2 高ニッケル基合金のPWSCC …… 142
6.5 燃料健全性の確保 …… 146
6.5.1 PWRの燃料集合体 …… 146
6.5.2 被覆管の環境と腐食 …… 146
6.5.3 PWR燃料の健全性 …… 148
6.5.4 被覆管健全性の監視 …… 150
6.5.5 燃料シッピング検査 …… 152
6.6 放射性腐食生成物の挙動 …… 153
6.6.1 被ばく線源の状況 …… 153
6.6.2 発生，放射化および移行挙動の概要 …… 154
6.6.3 挙動解析モデル …… 156
6.6.4 線量率低減対策 …… 158
6.7 運転操作と水化学管理手法 …… 163
6.7.1 水化学管理の変遷 …… 163
6.7.2 試運転時 …… 164
6.7.3 起動操作時 …… 165
6.7.4 出力運転時 …… 166
6.7.5 停止操作時 …… 167
6.7.6 水質調整設備 …… 168
6.7.7 放射性廃液処理設備 …… 169
6.8 サンプリング（試料採取）と分析方法 …… 169
6.8.1 測定の目的と意義 …… 169
6.8.2 サンプリング設備（試料採取設備） …… 170
6.8.3 分析方法 …… 171
6.8.4 モニタリング …… 171
6.9 データ管理システム …… 172
引用・参考文献 …… 174

7章　PWR 2次冷却系の水化学管理

7.1　2次系水化学管理の目的……176
7.2　2次系の系統構成……177
7.2.1　復水脱塩装置……178
7.2.2　SGブローダウン回収設備……178
7.2.3　クリーンアップ設備……179
7.3　水化学管理仕様……179
7.3.1　SGクレビス環境評価……179
7.3.2　ナトリウムおよび塩化物イオン……180
7.3.3　硫酸イオン……180
7.3.4　pHコントロール……180
7.3.5　カチオン電気伝導率……181
7.3.6　溶存酸素……181
7.3.7　ヒドラジン……181
7.3.8　全鉄……181
7.3.9　全銅および全ニッケル……182
7.3.10　シリカ……182
7.3.11　海外の水化学管理値……182
7.4　構造材健全性の確保……182
7.4.1　構造材の腐食環境……182
7.4.2　腐食生成物（鉄酸化物）の挙動と析出……191
7.4.3　SG伝熱管腐食の防止……192
7.4.4　SG器内付着スケール除去対策……197
7.4.5　2次系機器の腐食防止……198
7.5　運転操作と水化学管理法……200
7.5.1　水化学管理の変遷……200
7.5.2　建設試運転時……202
7.5.3　起動操作時……203
7.5.4　通常運転時……204
7.5.5　停止時……206
7.6　水質調整設備……207
7.6.1　浄化設備……207
7.6.2　薬注設備……209
7.6.3　排水処理設備……210
7.7　モニタリングと不純物分析……210
7.7.1　水質モニタリング……210
7.7.2　分析方法……212
7.7.3　異常時の水化学管理……213
引用・参考文献……213

8章 BWR 1次冷却系の水化学管理

8.1 水化学管理の目的 …… 215
8.1.1 1次系構成材料の健全性の確保 …… 215
8.1.2 放射線被ばく線量の抑制 …… 216
8.1.3 放射性廃棄物発生量の抑制 …… 216
8.2 系統構成と材料 …… 216
8.2.1 原子炉1次系構成 …… 216
8.2.2 材料選択 …… 217
8.3 水化学管理基準 …… 218
8.3.1 国内BWRプラントの水化学管理基準 …… 218
8.3.2 海外BWRプラントの水化学管理基準 …… 221
8.4 構造材健全性の確保 …… 223
8.4.1 炉内の腐食環境評価 …… 223
8.4.2 水素注入の実績 …… 228
8.4.3 貴金属注入の実績 …… 231
8.4.4 酸化チタン注入の実績 …… 236
8.4.5 材料健全性 …… 239
8.5 燃料健全性の確保 …… 241
8.5.1 BWR燃料集合体 …… 241
8.5.2 BWR燃料の健全性 …… 242
8.5.3 燃料健全性モニタリング …… 244
8.5.4 燃料シッピング検査 …… 245
8.6 放射性腐食生成物の挙動 …… 246
8.6.1 生成および移行挙動の概要 …… 246
8.6.2 主要な腐食生成物の発生源 …… 251
8.6.3 挙動解析モデル …… 255
8.6.4 線量率低減対策 …… 258
8.7 運転操作と水化学管理手法 …… 264
8.7.1 プラント運転操作と水化学管理 …… 264
8.7.2 プラント起動時の水化学管理 …… 264
8.7.3 プラント停止操作時の水化学管理 …… 265
8.7.4 プラント停止期間中の水化学管理 …… 267
8.8 浄化法 …… 268
8.8.1 BWR 1次冷却水系浄化設備 …… 268
8.8.2 浄化設備による不純物除去 …… 270
8.9 サンプリングと分析方法 …… 272
8.9.1 測定の目的と意義 …… 272
8.9.2 サンプリング法 …… 273
8.9.3 濃縮法 …… 275
8.9.4 分析法 …… 276
8.9.5 分析に当たっての留意事項 …… 278
8.10 放射性廃棄物発生量への影響緩和 …… 279
8.10.1 冷却水水化学制御と放射性廃棄物の関連 …… 279
8.10.2 放射性廃棄物処理システムの概要 …… 279
8.10.3 水化学制御法改善による廃棄物発生量の変化 …… 280
8.10.4 1次冷却水の最適水化学制御と放射性廃棄物発生量低減の両立 …… 281
引用・参考文献 …… 282

9章　その他の炉型での水化学管理

9.1　世界の原子力発電所 …… 287
9.2　VVER　炉 …… 289
9.3　CANDU　炉 …… 290
9.4　ガス冷却型炉 …… 292
9.5　黒鉛減速沸騰軽水冷却炉（RBMK） …… 293
9.6　高速増殖炉（LMFBR） …… 295
9.7　新型転換炉（ATR） …… 296
9.7.1　概　要 …… 297
9.7.2　原子炉冷却水の水化学管理 …… 300
9.7.3　重水系の水化学管理 …… 301
9.7.4　重水精製装置の水化学管理 …… 302
引用・参考文献 …… 304

10章　除　　染

10.1　除染の目的と方法 …… 305
10.1.1　除染の目的 …… 305
10.1.2　除染法の分類と特徴 …… 307
10.1.3　化学除染の開発・適用の経緯 …… 311
10.1.4　除染における材料の健全性評価 …… 317
10.1.5　除染の実機への適用方法 …… 320
10.1.6　除染廃棄物・廃液の処理方法 …… 325
10.1.7　除染の評価方法 …… 327
10.1.8　除染後の再汚染抑制方法 …… 328
10.2　除染の適用実績 …… 329
10.2.1　わが国における適用実績と実施例 …… 329
10.2.2　欧米における適用実績 …… 336
引用・参考文献 …… 338

11 章　福島第一原子力発電所事故後の水化学管理

11.1　福島第一原子力発電所事故の概要および水化学管理の課題 …… 341
11.2　機器の腐食課題と水化学的対策 …… 341
11.2.1　福島第一原子力発電所事故直後の腐食環境 …… 341
11.2.2　機器の構造と腐食課題 …… 343
11.2.3　水化学的な腐食対策活動 …… 344
11.3　福島第一原子力発電所の汚染水対策 …… 348
11.3.1　汚染水対策の概要 …… 348
11.3.2　汚染水処理の概要 …… 349
11.3.3　セシウム除去設備の目的および構成 …… 350
11.3.4　多核種除去設備の目的および構成 …… 353
11.3.5　サブドレン他水処理設備の目的および構成 …… 355
11.4　放射線分解および水素発生 …… 356
11.4.1　海水系での水の放射線分解 …… 356
11.4.2　ヨウ素系での水の放射線分解 …… 357
11.4.3　高線量放射性廃棄物による水素発生量評価 …… 357
引用・参考文献 …… 358

略　語　表 …… 360
索　　引 …… 366

Ⅰ. 基　礎　編

1章　水化学の基礎

1.1　高温水の基礎物性

1.1.1　水の分子構造

水分子 H_2O において，水素は酸素の直交している二つの電子軌道と共有結合しており，90° の角度をなすはずである。しかし，両原子に共有されている電子は水素原子より酸素原子に引き付けられる。このため，水素原子側は電子の存在割合が小さくなりプラス（+）に，酸素原子はそれが大きくなりマイナス（−）に帯電し，水を極性分子にしている。+に帯電した2個の水素原子が静電的に反発することも一因となり，実際の水素-酸素-水素の結合角度は 104.5° と拡大している。

また，水が液体状態のように分子間が非常に接近している場合には，+の水素と非共有電子対を持ち−に帯電している酸素とが強く引き付け合い，静電的な結合が起こる。これが水素結合である。水素結合は共有結合に比べて弱い結合であり，結合間距離も 1.80 Å と後者の 0.96 Å の約2倍になっている。

この水素結合のため，水の見かけ上の分子量は相当大きくなっているので，水は化合物としてはきわめて特異な物性を持っている。ここで，水素結合の割合を見てみると，統計的には**図 1.1** に示すように，常温付近では 70％の水分子が4個の水素結合で結ばれ[1]，これらは氷と同じ4配位座の4面体の結晶構造を形成している。残りの 30％は水素結合が3以下であり，明確な結晶構造を形成しえないので，全体としては液体状となっている。

なお，このような水素結合構造は特定の水分子に固定されているものではなく，ダイナミックに隣接分子間で結合形成，脱離が繰り返されており，図 1.1 の結合数は統計的な確率分布で表されているものである。

また，4個の水素結合からなる4面体構造はすきまの多い構造であるため，氷は密度が小さいが，常温付近の水の場合には数十％の水分子が存在し，この結晶構造が壊れてすきまが減少しているため，密度が大きくなる。これは，一般に多くの液体が分子間に化学結合がほとんどないため，温度上昇とともに膨張し密度は低下するのとは異なった特異な物性である。

さらに，温度が上昇すると分子の運動が活発になるので，図 1.1 のように4配位座の4面体構造を持つ分子の数は直線的に減少し，水の特異性も低下する。

水の特異性は沸点，融点，ならびにモル蒸発熱などに明確に現れている。沸点と融点については，**図 1.2** に示すように，同属の水素化物のなかでも水だけが特異的に大きく，同分子量の化合物と比較しても異常に大きくなっている。**図 1.3** に示すモル蒸発熱についてもまったく同様であり，水素結合の影響が明確に現れている。これは，熱媒体としてはきわめて貴重な特性であり，水が熱媒体として広く使用されている理由の一つである。

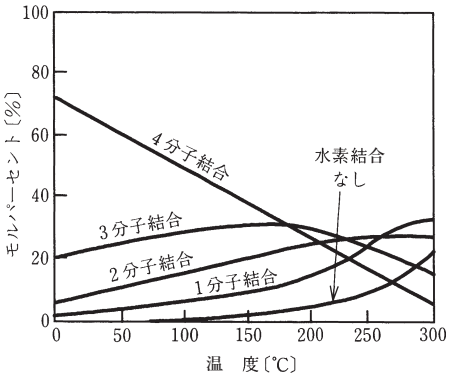

図 1.1　水素結合の割合と温度[1]

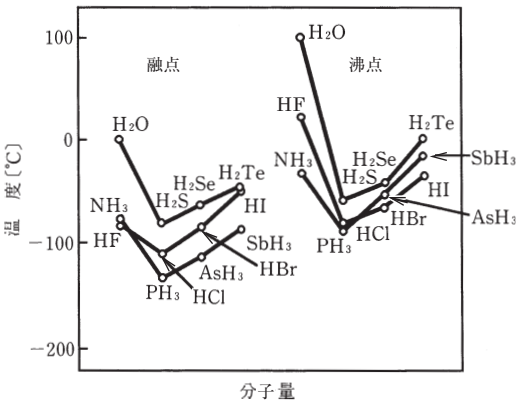

図 1.2　同族列元素の水素化物の融点と沸点[1]

索　　引

【あ】

亜鉛注入 161, 263
アクションレベル 141, 182, 218, 221
アクチニウム系列 60
アクチノイド 62
アコイオン 12
亜硝酸 236
圧力管 298
　——型重水炉 287
圧力容器 217
アニオンアンダーレイ法 270
アノード 49
　——酸化反応 30
　——電流 94, 224
　——電流密度 35
　——反応 91, 226
　——分極 37
　——分極曲線 37
　——防食法 92
アルカリ 94
アルカリプレフィルミング 261
アルミニウム黄銅 189
アルミニウム合金 95
アルミブラス 130, 177
アンモニア 51
　——アタック 200
　——添加法 160, 290

【い】

イオン 12, 246, 270
　——交換過程 43
　——交換基 41
　——交換樹脂 40
　——交換樹脂による粒子除去 46
　——交換帯 45
　——交換の過程 43
　——交換平衡 43
　——交換ペーパ法 275
　——交換法 48
移行速度定数 226
1 次系構成材料 138
1 次天然放射性核種 60
1 次不動態化電位 37
1 次冷却水の最適水化学制御 281
一様腐食 104, 105
陰イオン 47
インコネル 19
　——X-750 218, 320
　——600 218
インターナルポンプ 128
インピーダンス解析 40
インピーダンス測定 38
インピーダンス測定装置 38
インヒビター 345
インラインサンプリング 276

【う】

ウォータロッド 241
ウラン系列 60

【え】

エアレーション運転 156
エアロゾル 120, 122
鋭敏化 94
液体金属冷却高速増殖炉 295
液体クロマトグラフ法 276
液体シンチレータ 79
液滴モデル 58
エージング効果 46, 271
エタノールアミン 41, 176
エバンス図 226
エロージョン 163, 188
エロージョン／コロージョン 251
塩化物イオン 132, 138, 180, 219
エンタルピー 11, 21
エントロピー 11, 21
塩皮膜生成反応 30
塩分除去 346

【お】

応力拡大係数 99
応力腐食割れ 94
オキシ水酸化鉄 191
汚染水処理 349
オフガス 228, 244
オフガスモニタ 245
親核種 59, 62, 65
温態機能試験 158, 165

【か】

海水漏えい 195, 219, 221, 273
外層クラッド 163
　——除去法 163, 167
外層酸化物 163, 321
壊　変 58, 115
　——様式 58
改良型ガス炉 292
改良型制御棒駆動機構 128
改良型 BWR 217, 269
改良 7×7 燃料 241
改良標準化 125, 127
　——BWR 251
　——BWR プラント 280
　——前の BWR プラント 281
化学除染 309, 311, 328, 333
化学洗浄 197
化学線量計 76, 80
化学体積制御系 130
化学ポテンシャル 11, 30
架橋度 42
核異性体 59
　——転移 59
拡　散 24, 68, 244
　——限界電流 49
　——パターン 245
核種分析 277
核燃料被覆管 216
格納容器 118, 341
核の結合エネルギー 58
核分裂生成物 114, 357
　——の壊変スキーム 115
　——の挙動 116, 118
　——の生成収率 114
核分裂生成物鎖列 61
核分裂反応 61
隔膜電極 49
核融合反応 58
過酸化水素 162, 167, 223, 357
加水解離定数 18
ガス還元反応 30
ガスクロマトグラフ 51, 273
ガスクロマトグラフィー 51
ガス発生反応 30

仮想的理想溶液 11
数え落とし 81
カソード
——還元反応 30
——電流 224
——電流密度 35
——反応 91, 226
——防食 347
——防食法 92
カチオン電気伝導率 181
活性化律速 73
活性態域 92
活量係数 12
荷電粒子 75
過不動態電位域 37
過不動態溶解開始電位 37, 92
カランドリア管 298
カランドリアタンク 298
ガルバニセル 49
ガルバニック腐食 343
ガルバニ電池式ガスセンサ 52
カロメル電極 34
還元性化学種 224
還元溶解法 309
甘コウ電極 34
乾式ブラスト法 334
管支持板 184, 192
乾燥保管 165
管理項目 141, 181, 202, 218
貫流点 45
貫流容量 45

【き】

気液分配係数 194, 219
機械研磨 261
希ガス 150, 167
機器除染 311, 333, 334
貴金属注入 231
気水分離器 217
キセノンオーバーライド 116
起動時水素注入 231
起動時脱気運転 223
軌道電子 59, 65
希薄溶液除染 311
ギブスの自由エネルギー 11, 31
逆浸透膜 46
キャリヤ 63
9×9 燃料集合体 261
吸光光度法 276
給　水 132, 220, 278
——系 132, 263
——熱交換器 260
——ポンプ 298
給復水系浄化運転 268
キュプロニッケル 130
供用期間中検査 217, 333
供用中除染 306
局所水素化 149, 242
局所腐食 243
極低鉄／高ニッケル運転 263
局部電池 91
——による腐食 91
局部腐食 39
き裂進展
——挙動 226
——速度 98, 145, 239
——速度センサ 57
キレート剤 305
キレート成分 321
銀–塩化銀電極 34
金属酸化物の溶解度 18
金属ニッケル 160
金属不純物 220, 221
金属溶解析出反応 30

【く】

クラックフランキング 234
クラッド 27, 246, 270, 307
——除去 270, 330
——除去性能 42, 270
——鉄 249
——の性状 246
——付着分布 249
クリーンアップシステム 177
クレビス 178
クレビス環境評価 179
クロマイト 22, 250
クロマトグラフィー 48
クロム酸イオン 266
クロム酸化物 22, 247
クーロン斥力 61
グンドレミンゲン運転 266

【け】

蛍光 X 線分析法 276
軽水炉改良標準化計画 127
形態分析 52
系統除染 329, 334
ケークろ過 45
欠員元素 62
ケミカルシム 125, 135
ゲル型イオン交換樹脂 42
限界電流密度 36, 227, 345
原子吸光法 276
原子炉
——圧力容器 128, 216, 217, 343
——1 次系 217, 252
——構成材料 291
——水化学 225
——冷却材 45, 88
減速材 87
元素分析 276
減　肉 188

【こ】

高圧ジェット洗浄 197
高圧水噴霧除染 335
高温高圧溶存酸素計 55
高温高圧溶存水素計 55
高温水蒸気中腐食試験 110
高温電気伝導率計 55
高温 pH 計 55
交換電流密度 35, 227
高経年化 173, 216
孔　食 93
高性能多核種除去設備 354
構造材強度 215
構造材健全性 182, 223
高速炉 296
高ニッケル運転 24
高燃焼度化燃料 216
高燃焼度 8×8 燃料 241
高 pH 運転 136
高 pH（高アンモニア）処理 176, 195
高リチウム濃度管理 160
交流測定法 39
高レベル放射性廃棄物 246
黒鉛減速沸騰軽水冷却炉 293
極低鉄／高ニッケル運転 263
固相抽出法 48
固体電解質ガスセンサ 52
固体電解質型電極 57
固体の溶解度 5
コバルト 220
——基合金 320
——酸化物 247
——低減 259
——の吸着 28
——発生源 253
——フリー材 158

——溶出速度 253
コラップス 148
コランダム型酸化物 19, 24
コールドトラップ 296
コルモノイ 252
コロイド 48
混床式脱塩塔 132, 268
混成電位モデル 226
コンバインド発電 289

【さ】

再汚染 305, 328
再汚染抑制方法 328
再稼働 125, 216
再結合反応 228
再循環系 131, 216
再循環系配管 216, 217
再循環ポンプ 298
再　生 41
再生工程 44
再生効率 44
最適水化学制御 281
サイドストリーム 269
材料健全性 306, 317, 333
材料表面処理 260
作業従事者 136, 305
——の放射線被ばく 217
——の放射線被ばく線量 215
酸化亜鉛 264
酸化還元反応 29
酸化剤 194
酸化性化学種 224
酸化チタン 236
——注入 236
酸化皮膜 22, 260, 328
——の化学溶解法 309
——の還元溶解法 309
——の酸化溶解法 309
——の酸溶解法 309
——の熱力学的安定性 22
酸化皮膜形成反応 30
酸化物の物性 19
酸化物への吸着 28
酸化溶解法 309
酸可溶鉄 140
参照電極 34, 55
酸素注入 197, 263
酸素濃度 229
酸素発生電位域 37
三体核分裂 114
サンバースト破損 243
サンプリング 169, 272
サンプリング設備 170
サンプリング法 273
酸溶解法 309

【し】

ジェット洗浄 207, 334
ジェットポンプ 217
紫外線 49. 236
磁気相互作用 19
磁気転移温度 24
シッピング検査 152, 245
質量欠損 58
質量収率 62
質量数–収率曲線 62
自発核分裂 60, 61
遮へい 90
——材 90
10×10 燃料 242
重水精製施設 300
重水精製装置 300, 302
重水炉の圧力管 101
重量分析法 48
樹脂の非再生運用 282
樹脂母体 40
主蒸気系 132, 216
主蒸気系線量率 230
出力抑制運転 243
寿命予測 99, 228
純 Ge 半導体検出器 277
浄化系配管 235
浄化設備 268, 270, 356
蒸気乾燥器 217
蒸気発生器 125, 158
蒸気表 2, 90
硝　酸 231
照射誘起応力腐食割れ 215
使用済燃料プール 341
蒸発乾固モデル 249
蒸発濃縮法 48
上部格子板 217
除　染 305, 329
——係数 321, 327
——廃棄物 325
ジラード・チャルマーズ効果 65
シリカ 140, 182, 220, 270
ジルカロイ 19, 100
——酸化物 249
——2 101
——4 101, 147
ジルコニウム 100
ジルコニウム合金 100
ジルコニウムライナー燃料 241
新型 8×8 燃料 241
新型転換炉 296
浸　食 93
診断項目 141, 218, 223
シンチレーション検出器 76, 78
シンチレータ 78

【す】

水　質 47, 107, 144
——環境改善 223
——管理 162, 196, 219
——管理基準 215, 221, 296
——管理値 218, 219
——基準 141
——制御 107, 268
——制御技術 268
水蒸気 90
——の比エンタルピー 89
——の比容積 89
——の密度 89
推奨値 219
水　素 167
水素化物 1
水素吸収 149
水素結合 5, 8
水素ぜい性 94, 96
水素注入 109, 223, 228, 229, 230, 231, 235, 300
水素注入技術 133, 223
水素濃度 3, 143
水和電子 70
水和物 220
スカイシャイン 231
スカベンジャ効果 64
すきま腐食 343
スケール 292
——除去 197
——付着 191
——分散剤 197
ステップ 1 燃料 241
ステップ 3 燃料 241
ステップ 2 燃料 241
ステライト 253
——合金 217
——の代替材 218, 260
——盛り 252

ステンレス鋼　19, 93, 95, 130, 320
ステンレスの腐食　231
スパー　67
スピネル　161
　——型酸化物　19, 321
スペーサばね　250
スラッジ　176, 197, 352
スラッジランシング　197
スリーブ補修　201
スワールベーン　183

【せ】

制御棒　217, 300
　——駆動機構　127
　——駆動装置　267
　——のピン・ローラ　260
清浄度管理　176
正方晶　105
精密ろ過膜　46
積算線量測定器　80
析出速度　231
セシウム　117, 349
　——化学　118
　——吸着装置　351
　——除去設備　350
ゼータ電位　46
接触燃焼式ガスセンサ　51
遷移金属　353
遷移金属酸化物　19
　——中の拡散　24
　——の結晶構造　19
　——の電気的・磁気的性質　24
　——の電気伝導率　24
　——の熱力学　21
全揮発性薬品処理　176
全面腐食　163, 215
全有機炭素　96
線量率　333
線量率低減　260, 329
線量率低減対策　258

【そ】

測定頻度　219, 273
即発中性子　61

【た】

対応原理　13
耐候性鋼　259, 281
代替アミン処理　176, 196
第二セシウム吸着装置　352
ダウンカマ　228
多核種除去設備　349, 353
濁　度　140, 278
多孔性イオン交換樹脂　42
脱塩塔入口フィルタ　168
脱気水満水保管　267
建屋除染　335
タービン　188, 198
炭素鋼　95, 231, 235, 252, 320, 344
単斜晶　105
担　体　63

【ち】

チェルノブイリ事故　122
チェレンコフ光　236
蓄積型蛍光体　80
蓄積型蛍光体線量計　76
チタン　130
チタンコンデンサ　260
遅発中性子　61
チャンネルボックス　241
中空糸膜　46
　——フィルタ　262, 269, 271
中性子　58, 76, 87
　——吸収断面積　114
　——検出器　79
　——減速材　135, 215
　——遮へい効果　90
中性有機物質　47
超ウラン元素　62
超臨界圧軽水冷却炉　10
超臨界水　5
　——イオン積　7
　——解離定数　7
　——自己拡散係数　8
　——水素結合　5
　——熱伝導率　8
　——熱容量　5
　——粘度　8
　——の応用　9
　——の誘電率　6
　——溶解特性　7
直接サイクル　215
直線分極法　39
直流・交流腐食速度計　57
直流測定法　39
沈降速度　251
沈殿法　48

【つ】

追加放出量　151
粒状イオン交換樹脂　268

【て】

定期検査　132, 153, 258, 305, 323
低合金鋼　95, 259, 320
抵抗分極　39
低コバルト材料　252
停止時の水質管理　162
定性分析法　48
定電位 SSRT　185
定電位電解式ガスセンサ　52
低濃度酸素注入　196
定バックグラウンド化技術　80
低融点金属　202
定量分析法　48
定歪試験　99
テクネチウム　63
デコミ除染　306
データ収集システム　172
鉄クラッド　252, 258
　——低減　258
　——発生源　252
鉄酸化物　191
鉄持込み量　181, 249
デバイ-ヒュッケルの限界則　12
電位-電流曲線　38, 226
電位-pH 図　31, 91, 142, 309
電解研磨　261
電解質水溶液　12
電解セル　30
電荷移動過程　35
電気化学的平衡電位　227
電気化学反応　30
電気式カチオン膜　181
電気双極子モーメント　68
電気抵抗法　97
電気伝導率　138, 219, 221, 278
電気伝導率計　55, 172
電気伝導率測定　40, 277
電極電位　32
電極反応速度　35
電磁型ろ過器　46
電磁フィルタ　271
デンティング　187, 195
電離箱　76

【と】
銅 220, 221
同位体比 117
等速吸引 170
等電点 27
等電点 PZC 27
トーネス炉 293
ドライキャスク 118
トリウム系列 60
トリチウム 114
——化学 118
——濃度 303
トンネル化学反応 66

【な】
内層酸化物 163, 321
内層のクラッド 249
内部参照電極 57
流れ加速型腐食 97, 176
ナトリウム 180, 296
7×7 燃料 241

【に】
2 次天然放射性核種 60
2 次廃棄物 262, 356
2 次廃棄物発生量発生抑制 281
2 次不動態化電位 37
2 段階腐食試験法 110
ニッケル基合金 144, 320
日本原子力学会標準 182, 218

【ね】
ネオプレンゴム 189
熱中性子吸収断面積 87
熱伝達率 220
熱容量 5, 17
ネーバル黄銅 189
燃焼度 115, 152
燃　料
——クラッド 249
——健全性 146, 215, 241
——健全性モニタリング 244
——シッピング検査 152, 245
——集合体 87, 146, 241, 298
——デブリ 122
——破損 149
——被覆管 100, 150, 249
——被覆材 100
——付着クラッド 109, 249
——棒の曲がり 150

【の】
濃厚溶液除染 311
濃縮 ^{10}B 132, 135
濃縮 ^{7}Li 136
濃度分極 39
ノジュラー腐食 104, 106

【は】
配管洗浄 202
配管線量率 231
廃棄物 10, 207, 325
——処理系 268, 311
——発生量 280, 333
ハイドアウトリターン 206
破壊力学試験 98
破損率 216
8×8 燃料 241
白　金 232
パッキン 177
800 合金 158, 194
バッフルジェット 149
バルク水 97, 179
半減期 66, 88, 115, 277
反跳パターン 244
反跳陽子計数管 79
半導体ガスセンサ 51
半導体検出器 76, 77, 277
反応速度定数 70, 73, 225

【ひ】
光触媒 236
非再生運用 268
非常用炉心冷却系 216
ヒータドレン 222
ピッティング 187, 195
非電解質水溶液系の熱力学 11
ヒドラジン 181
被ばく線量 216
被ばく低減 136
被ばく低減対策 258
比放射能 154, 247
非密封 RI 66
標準状態 11
標準水素電極 31, 34
標準線源モニタリング 153
標準電極電位 31
表面処理 27
表面張力 3
微量元素分析 47, 51, 52
比例計数管 76, 77

【ふ】
ファラデー定数 31
フィルタスラッジ 9
フィルタ濃縮分析手法 182
フィルタ濃縮法 48
フィルムフォーミングアミン 197
フェライト 22, 250
フガシティー 11
不感性域 32
副資材 164, 202
福島第一原子力発電所事故 122, 341, 345
復　水 132, 278
——器 132
——系 132
——浄化系 46, 279
——浄化系二重化プラント 269
——浄化設備 268
——処理装置 207
——前置フィルタ 251
——脱塩器 279
——脱塩装置 208, 221
——脱塩塔 267
——貯蔵タンク 280
——フィルタ 280
ふげん 297
不純物 109, 181, 207, 270
不純物拡散 26
腐　食 91, 100, 146, 149, 176, 183
——域 32
——環境評価 223
——減量法 97
——試験法 98
——反応 37, 91, 103
——疲労 200
——モニタリング 97
腐食生成物 132, 251, 255
——挙動解析モデル 156, 255
——の発生源 251
腐食速度の遷移 104
腐食電位 37, 56, 226
腐食電流 37
腐食電流密度 38
付着クラッド 110, 146
フッ化物イオン 132, 138
物質移動過程 36
沸騰濃縮法 276

沸騰濃縮モデル 249
物理除染 334
不動態 36, 92
——域 32
——皮膜 92
——皮膜形成反応 92
不溶解性 221
不溶性微粒子 275
プライマリー生成物 68, 71
ブラスト除染 335
プラズマ質量分析計 277
プラズマ発光分光法 276
フラッシング 164
プラント起動 129, 264
——時の水化学管理 264
プラント診断システム 173
プラント停止期間 267
——中の水化学管理 267
プラント停止操作 265
——時の水化学管理 265
プリコート 45
プリコート式ろ過器 45
プリコート式ろ過脱塩器 269
プリーツ型ろ過器 46
プリーツフィルタ 269, 271, 280
ブレイクアウェイ 104
プレストレストコンクリート圧力容器 292
フレッティング破損 244
プレナム 117
プレフィルミング 260
プロメチウム 63
分極曲線 36
分光化学的分析法 48
分散性固体微粒子 48
粉状イオン交換樹脂 280
粉末樹脂 262

【へ】

平　衡 11, 244
——パターン 244
平衡電位 35, 91, 227
平衡電極電位 30
ヘマタイト 28
ヘンリー定数 4, 11

【ほ】

崩壊熱 115
ホウ酸 138
——注入 201
放射化 49, 154, 247
放射化断面積 88
放射化分析法 49
放射性
——核種 58, 60
——核分裂生成物 136, 216, 244
——希ガス 121, 167
——クラッド 248
——クラッド濃度上昇抑制運転 266
——窒素 230
——廃液処理設備 169
——廃棄物 216, 279
——廃棄物処理システム 279
——廃棄物発生量 216, 279, 281
放射性腐食生成物 153, 216, 246, 255
イオン状—— 246
クラッド状—— 246
——挙動解析モデル 156, 255
——の挙動モデル 255
放射線 58, 67
——遮へい材 262
——被ばく 216
——被ばく線量 216
——分解 71, 109, 224, 291, 356
——分解挙動 224
——分解生成物 71, 224
——分解反応 70
放射能 74
——インベントリ 216, 321
——蓄積速度 328
——低減対策 133, 251
——付着抑制 251
防錆剤 177
ホウ素 138
ホウ素濃度計 172
保管管理 216
ホットアトム 63
ホットアトム化学 63
ポテンシャルドロップ法 57
ポテンショスタット 38
ボトムドレンライン 232

【ま】

マークⅠ型格納容器 129
マークⅡ型格納容器 129
マグネタイト 197
——フィルタ 270
マグノックス炉 292
摩擦腐食 244
満水酸化運転 156

【み】

水 90
——イオン積 2
——の解離定数 2
——の気体の溶解度 4
——の固体の溶解度 5
——の自己拡散係数 8
——の蒸発潜熱 90
——の熱伝導率 8
——の粘度 8
——の表面張力 3
——の比エンタルピー 89, 90
——の比容積 89, 90
——の分子構造 1
——の放射線分解 67, 109, 224, 356
——の飽和圧力 90
——の誘電率 2, 6
——の臨界点 5
水化学 1
——ガイドライン 222
——管理 135, 165, 176, 215, 287, 341
——管理基準 138, 140, 218
——管理指針 222
——制御法 280
水処理系 261
水分子のイオン化 67
水分子の励起 67
密度–温度–圧力ダイヤグラム 6
密封 RI 線源 67

【む】

娘核種 59, 65

【め】

メスバウアー分光 21
メンブレンフィルタ 275

【も】

モデレータ効果 64
モネル 400 184
モル蒸発熱 1
モルフォリン 196
もんじゅ 295

【や】

薬注設備 209
薬品再生 42

【ゆ】
有機不純物 272
誘導天然放射性核種 60
誘導放射能 88
遊離アルカリ 179, 201

【よ】
陽イオン 12, 47
——脱塩塔 137
陽／陰イオン交換樹脂 261
溶解固形分 181
溶解性 47, 221, 255
溶解度 4, 18
陽　子 58
溶　出 255
——速度 256
——率 231
溶接残留応力 223
溶接熱影響部 318
ヨウ素化学 118
ヨウ素核種の追加放出 266
溶存気体濃度 49
溶存酸素 49, 109, 140, 181, 220, 221
——計 55, 172
——濃度 97, 190, 229, 346, 347
——濃度測定 278
溶存水素 49, 140
——計 55, 172, 278
——濃度管理 160
溶媒抽出法 48
容量分析法 48
余熱除去系 129

【ら】
ラジオリシス 220, 356
ラジカル 65, 225

【り】
リアルタイム測定器 76
リチウム 138
粒界型応力腐食割れ 223
粒界腐食 94, 176
硫酸イオン 138, 220
粒子除去 40, 46
粒子除去機構 45
粒子誘起核反応 60
粒状イオン交換樹脂 268
量子力学トンネル効果 66
臨界点 5
リン酸塩処理 201

【る】
累積収率 62
累積焼鈍パラメータ 106

【れ】
冷却材 87
——フィルタ 168
冷却水 40, 47, 132
——温度 131

【ろ】
炉外シッピング 246
ろ過器 40, 45
ろ過助剤 45
ロシア型 PWR 287
ロジウム 232
炉心構造材 250
炉心支持板 217
炉心シュラウド 217
炉　水 219
——系 274
——浄化系 262
——浄化設備 268
——浄化装置 273
——水質 264
——中の腐食生成物濃度 255
——電気伝導率 223
——pH 257
——溶存酸素濃度 231, 264
600 合金 136, 142, 143
690 合金 136
炉　内 217
——機器 217
——構造物 216, 217
——シッピング 245
——鉄クラッド持込み低減対策 263

【わ】
ワイゼッカー-ベーテの質量式 58

【A】
α 壊変 58
A286 合金 143
AAS 52
ABWR 129, 217, 269
ACE コード 157
AES 52, 53
AFM 54
Ag／AgCl 型参照電極 56
AGR 292
ALPS 349, 353
AMDA 335
AOA 136, 148
AP 309
AP-AC 311
AP-Citrox 311
APWR 127
ARCS 262, 281
ASCA 198
ATR 296
AVT 45, 176, 201
——処理 46, 182

【B】
β 壊変 59
BEC 184
BF_3 比例計数管 79
BJ 燃料 263
Born の式 14
BRAC 線量率 234
Butler-Volmer の式 36
BWR 127, 215
——1 次系浄化設備 269
——1 次冷却水 268
——1 次冷却水系 268
——プラント 215, 280
——プラント 1 次系 227

【C】
^{14}C 64
CAN-DECON 法 313
CANDEREM 法 314
CANDU 炉 290
CBB 試験 99
CD 208, 267
CF 208, 262
CILC 109, 243
CIPS 148
Citrox 313
CNC 232

^{58}Co 153
^{60}Co 153, 274
Co の取込み 247
Co 発生源 217
COD 196
Cole-Cole プロット 39, 55
CORA コード 156
CORD 法 313, 314, 320
CORD-UV 法 335
CP 136, 156
^{51}Cr 133
Cr 含有量 93
Cr 欠乏帯 94
CRD 267
Criss-Cobble 法 13
CRSEC コード 157
CRUDSIM コード 157
^{134}Cs 117, 152
^{137}Cs 117, 152
CT 試験 320
CT 試験片 57, 99

【D】

D&D 306
DB 262
DCB 57
DF 321, 327
DFD 法 317
DZO 264

【E】

ECP 232
ELOMIX 法 326
EMMA 法 313, 314
EPMA 53
EPRI 97
EPRI ガイドライン 140, 182, 222
ETA 176
　——処理 205
EXAFS 54

【F】

FAAS 50
FAC 97, 176
fission chain 61
FP 136, 244, 357
　——放出パターン 244
FSD 337
FT-IR 50

【G】

γ 壊変 59
γ 線 75
G 値 68, 71, 224
GC 50, 51
GC-MS 52, 53
GCR 292
GD-MS 53
GDS 53
Ge 半導体検出器 153
GEZIP 263
GFAAS 50
GM 管 76, 77, 153

【H】

HFF 208, 262
HIC 325
Hi-F コート 261, 328
HKF 法 14
H_2O_2 68
HOP 法 313, 314, 320
HOR 206
HPLC 50
HWC 109, 222

【I】

^{131}I 118, 151
IASCC 215
IC 50, 51
ICP 52
ICP-AES 50
ICP-MS 50, 52, 277
IGA 176, 185, 192
IGSCC 219, 223
　——感受性 96, 226
IR 50, 53, 54
ISI 217

【K】

KD-203 法 313, 320
KOH 290
^{85}Kr 67

【L】

LET 効果 69
LMFBR 295
LOMI 法 313, 314
LPRM 232
LTNC 328

【M】

MA600 合金 142
MAG 193
MMS 232
^{54}Mn 133
MOX 燃料 242, 297
MS 50

【N】

^{16}N 65
Na/Cl モル比 179
Nernst の式 31, 92
Ni イオン濃度 247
$NiFe_2O_4$ 249
Ni/Fe 制御 250
Ni/Fe 比制御 263
Ni/Fe 濃度比 257
Ni/Fe 比コントロール運転 263
NiO 160, 247
NMCA 231
NMR 53
NP 309
NS-1 313
NWC 222

【O】

OH ラジカル 70, 356
OLNC 232

【P】

PACTOLE コード 156
PCI 242
PCI 破損 150, 243
PCIOMR 242
PCMI 150
PDM 57, 98
pH 138, 220, 278
　——計 55, 172
　——コントロール 180, 346
　——測定 277
Phébus FP プロジェクト 118
Pilling-Bedworth 比 104
PIXE 53
PNS-Citrox 除染法 314
POD 法 314
Pourbaix 31
PSS 209, 270
PWR 125, 135, 176
PWSCC 142, 143, 145

PZC 27

【R】

Raman 53
RBMK 293
RBS 53
RHR 232, 237
——系原子炉停止時冷却モードの低温投入 266
——洗浄運転 266
RJ 燃料 263
RPV 217
RUB 試験 144

【S】

SCC 94, 142, 163, 166, 198
——感受性 99, 239
——試験法 98, 320
——寿命予測 99
——対策 300, 329
——抑制 234
SEM 54
SFP 343
SG 伝熱管 192
SG の汚れ係数 191
SG バルク水 184
SG ブローダウン 177, 179
SHE 31
SIEMENS 314
SIMS 52, 53
SRMP 153
SSRT 239
——試験 99, 239

【T】

Tafel 直線外挿法 39
Tafel の式 36
TEM 54
TIG 193
TiO_2 56
TMI-2 事故 121
TOC 50, 96
T-OZON 法 315, 320, 331
TT600 合金 142
TT690 合金 142, 144

【U】

UCL 試験 99, 239
UT 234
UV-VIS 50

【V】

VGB 140, 222
VGB ガイドライン 222
VVER 炉 289

【W】

Way-Wigner の式 116

【X】

X 線 75
^{133}Xe 152
XPS 52, 53
XRD 54, 55
XRF 48, 50, 53
X-750 合金 142, 145

【Z】

^{64}Zn 264
Zn イオン濃度 247
Zn 注入 110
$ZnFe_2O_4$ 249
Zr ライナー管 101

改訂 原子炉水化学ハンドブック
Handbook of Water Chemistry of Nuclear Reactor System（Second Edition）
© 一般社団法人 日本原子力学会　2000, 2022

2000 年 12 月 27 日　初　版第 1 刷発行
2022 年 9 月 30 日　改訂版第 1 刷発行

検印省略

編　　者　一般社団法人
日本原子力学会
水化学部会
発行者　株式会社　コロナ社
代表者　牛来真也
印刷所　新日本印刷株式会社
製本所　有限会社　愛千製本所

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発行所　株式会社　**コロナ社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-06662-3　C3043　Printed in Japan　（大井）

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。