

資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 御中

令和 4 年度新産業創出等研究開発事業(放射性物質 の分析のための人材育成カリキュラムの作成等に 係る調査等事業) 報告書

MRI 三菱総合研究所

2023 年 3 月

セーフティ&インダストリー本部

目次

1. はじめに.....	1
1.1 事業目的	1
1.2 事業内容	1
1.2.1 研修対象とする分析手法の調査・特定	1
1.2.2 効率的・効果的な研修方法の検討	1
1.2.3 必要な施設・設備の調査	1
1.2.4 外部有識者などを対象としたヒアリングの実施	2
1.2.5 その他・報告書の作成	2
2. 研修対象とする分析手法の調査・特定.....	3
2.1 福島第一原子力発電所の主要なリスク源と廃棄物.....	3
2.1.1 燃料デブリ・建屋内汚染構造物等.....	5
2.1.2 使用済燃料.....	6
2.1.3 汚染水等	7
2.1.4 水処理二次廃棄物・ガレキ等	9
2.2 分析手法についての検討・特定	11
3. 効率的・効果的な研修方法の検討.....	13
3.1 分析人材に対する研修要件	13
3.1.1 分析人材の育成目標.....	13
3.1.2 分析人材の育成項目(研修カリキュラム(案))	15
3.2 研修方法の検討.....	27
3.3 各分析手法における研修プログラムの作成	28
3.3.1 ICP-MS.....	28
3.3.2 液体シンチレーションカウンタ	30
3.3.3 Ge 半導体検出器.....	32
4. 必要な施設・設備の調査.....	34
4.1 施設・設備に係る調査.....	34
4.2 研修会の開催規模等に係る検討結果.....	40
5. 外部有識者などを対象としたヒアリングの実施	41
6. まとめ	47

6.1 成果の概要	47
6.2 R5年度以降に実施すべきこと	48

図 目次

図 2-1 1F における廃棄物の分析状況および見通し	5
図 2-2 燃料デブリ取り出しのスケジュールプラン	6
図 2-3 強化された海域モニタリング計画(海水)	8
図 2-4 強化された海域モニタリング計画(魚類、海藻類)	8
図 2-5 2023 年 2 月改訂版 保管管理計画の概要(ガレキ等、水処理二次廃棄物)	10
図 2-6 固体廃棄物の性状把握の進め方と分析試料数	10
図 3-1 化学分析におけるあるべき体制(例)	14
図 3-2 分析作業者及び分析作業管理者に求められる力量要素の整理	15
図 3-3 分析フロー(ICP-MS)	29
図 3-4 分析フロー(液体シンチレーションカウンタ)	31
図 3-5 分析フロー(Ge 半導体検出器)	33
図 6-1 R5 年度事業の概略スケジュール(案)	48
図 6-2 R5 年度以降の展開(案)	49

表 目次

表 2-1 福島第一原子力発電所の主要なリスク源と廃棄物.....	4
表 2-2 1F において使用されている分析手法および対象核種.....	11
表 2-3 研修対象とする分析手法の調査・特定のまとめ.....	12
表 3-1 整備すべき研修カリキュラム(案).....	16
表 3-2 整備するカリキュラム(案)(力量要素に応じた分類).....	17
表 3-3 「放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む)」のカリキュラム内容案.....	18
表 3-4 「放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む)」の参考文献.....	18
表 3-5 「放射性廃棄物の運搬、保管、処分に関する知識」のカリキュラム内容案.....	19
表 3-6 「放射性廃棄物の運搬、保管、処分に関する知識」の参考文献.....	20
表 3-7 「分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢」のカリキュラム内容案.....	22
表 3-8 「分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢」の参考文献.....	23
表 3-9 「福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む)」のカリキュラム内容案.....	24
表 3-10 「福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む)」の参考文献.....	25
表 3-11 研修実施方法と研修の狙い、研修効果の測定に関する検討.....	27
表 3-12 研修カリキュラム(案)(ICP-MS).....	29
表 3-13 研修カリキュラム(案)(液体シンチレーションカウンタ).....	31
表 3-14 研修カリキュラム(案)(Ge 半導体検出器).....	33
表 4-1 研修会の内容と開催規模の想定について.....	40

1. はじめに

1.1 事業目的

東京電力ホールディングス株式会社(以下、「東京電力 HD」という。)の福島第一原子力発電所(以下、「1F」という。)には、通常炉には存在しない『多様な性状の大量の廃棄物』や『未知の性状である燃料デブリ』が存在する。これらの『保管・管理』、その後の『処理・処分』の検討には、含まれる放射性核種とその量を正確に把握する必要があり、放射性物質の分析作業が必須である。さらに今後は、国内の通常炉の廃止措置や、再処理工場の稼働も始まり、これらの廃止措置、再処理に向けた分析も必要となるため、放射性物質の分析人材のニーズはますます増加することが確実である。そのため、国内の研究所、企業、大学等においては、計画的に放射性物質の分析人材を育成・確保していくことが急務であるが、多くの分析企業では体系的な育成カリキュラムは整備されておらず、現場でのOJTが主の状況であり、その技術習熟度と習熟までの期間には個人差がある。

このような状況を踏まえ、本事業では、国として1Fに係る廃炉を滞りなく進め、ひいては今後の国内における廃止措置事業にも資するため、短期間で画一的に高いレベルを持った放射性物質の分析人材を大量に育成することを目的とし、国内の研究所、企業、大学等向けの『実践的な研修プログラム』を整備するとともに、次年度以降の研修会実施の実現可能性について調査することとする。

なお、本事業は令和4年3月29日の復興推進会議で決定された『福島国際研究教育機構(仮称)(以下、「機構」という。)基本構想※』に記載されている『放射性物質の分析人材育成』に資するものである。

1.2 事業内容

1.2.1 研修対象とする分析手法の調査・特定

1Fの固体廃棄物等の分析を行う上で重要となる分析手法について調査を行い、本育成カリキュラムで取り扱うべき分析手法について検討・特定する。

1.2.2 効率的・効果的な研修方法の検討

1.2.1項で特定した育成カリキュラムで取り扱うべき分析手法について、効率的かつ効果的な研修となるような研修実施方法を検討する。

1.2.3 必要な施設・設備の調査

次年度以降の研修会実施に向けたFS調査として、研修会の開催規模、それに必要な施設・設備の調査・検討を行う。なお、上述したとおり、本事業は『機構』の一部事業であるため、研修会の開催地は福島県の浜通り地域で実施することとする。

1.2.4 外部有識者などを対象としたヒアリングの実施

本カリキュラム作成に当たっては、1F の特殊性を踏まえ、実際にそれを受講する分析企業と有識者の意見も反映する必要があるため、事業者と有識者等の意見交換会を適宜開催する。なお、意見を伺う分析企業及び有識者に関しては選定したのち、担当課と協議のうえ決定するものとするが、おおむね2回程度の開催を想定する。

1.2.5 その他・報告書の作成

上記に掲げる事項の他、事業を実施する上で必要となる事項については、適宜、担当課と調整の上で実施する。また、事業の成果について、報告書を取りまとめる。

2. 研修対象とする分析手法の調査・特定

対象とする 1F の廃棄物の性状や想定される発生量、汚染度、汚染核種などを踏まえ、重要となる分析手法を優先的に選定し、研修カリキュラムで取り扱うべき分析手法について特定した。

2.1 福島第一原子力発電所の主要なリスク源と廃棄物

「東京電力 HD(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」を参照し、今後 10 年間で発生し得る放射性物質の分析作業を調査した。表 2-1 に福島第一原子力発電所の主要なリスク源と廃棄物を示す。

廃棄物については、2016 年 3 月に、今後 10 年程度の廃棄物の発生量を予測した「東京電力 HD(株)福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画」が策定され、進捗状況等に応じた更新を実施しながら、固体廃棄物貯蔵施設・減容施設の増設や焼却炉による減容処理等、廃炉工程を進める上で増加する廃棄物を適切に保管・管理するための取組が進められている。当面 10 年程度の発生量予測は今後の廃炉作業の進捗状況等により変動するため、年に 1 回発生量予測の見直しを行い、適宜保管管理計画を更新しており、2023 年 2 月に 6 回目の改訂が行われた¹。

廃棄物に係る保管・管理等の検討を進めるためには、固体廃棄物の性状や多様な核種組成を把握するための分析が必要であり、東京電力 HD では、JAEA と協働して放射性物質分析・研究施設の整備が進められている。今後、廃炉作業の進捗状況等により多様な性状の分析試料数が増加することが予想され、JAEA および東京電力 HD の分析作業者の育成・確保を計画的に進める必要がある。現在、分析量は震災前の約 16 倍、年間約 80,000 件に増加しており、分析試料数は年間約 30,000 試料の分析が行われている状況にある²。図 2-1 に 1F における廃棄物の分析状況および見通しを示す。2030 年までに燃料デブリ取り出しの進捗や ALPS 処理水の海洋放出等が計画されており、これまで以上に分析量が増加することが見込まれている。

¹ 東京電力 HD 株式会社、福島第一原子力発電所 固体廃棄物の保管管理計画～2022 年度改訂について～(2023 年 2 月 22 日)

² 東京電力 HD 株式会社 理事 石川 真澄、廃炉作業における分析の状況と課題について、第 6 回 福島第一廃炉国際フォーラム(2022 年 8 月 29 日)

表 2-1 福島第一原子力発電所の主要なリスク源と廃棄物³

燃料デブリ		1～3 号機の原子炉圧力容器(RPV)/原子炉格納容器(PCV)内の燃料デブリ
使用済燃料	プール内燃料	1～2 号機の使用済燃料プール内に保管されている燃料集合体
	共用プール内燃料	共用プール内に保管されている燃料集合体
	乾式キャスク内燃料	乾式キャスク内に保管されている燃料集合体
汚染水等	建屋内滞留水	1～3 号機原子炉建屋、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋内に滞留する汚染水、1～3 号機建屋底部の α 核種含有スラッジ
	ゼオライト土嚢	プロセス主建屋及び高温焼却炉建屋地下階に設置された土嚢内のゼオライト等
	溶接型タンク内貯留水	溶接型タンク内に保管されているストロンチウム処理水、ALPS 処理水等(ALPS 処理水及び処理途上水)
	フランジ型タンク内残水	フランジ型タンク底部に残っている濃縮塩水の残水及び α 核種含有スラッジ
水処理二次廃棄物	吸着塔類	セシウム吸着装置等の各種の汚染水処理設備から発生した使用済吸着塔等
	ALPS スラリー	多核種除去設備、増設多核種除去設備で発生した、高性能容器(HIC)に保管されているスラリー、廃吸着材
	ALPS スラリー (移替え対象 HIC)	β 線照射の影響を受けた HIC のうち、積算吸収線量が基準値 5,000kGy(落下に対する構造健全性が確認できている積算吸収線量)を超えた又は超える時期が近いと評価され、2023 年度末までに HIC 移替えが計画されている ALPS スラリー
	除染装置スラッジ	除染装置の運転に伴って発生した凝集沈殿物
	濃縮廃液等	濃縮塩水を蒸発濃縮装置で更に濃縮減容した濃縮廃液及び濃縮廃液から収集した炭酸塩スラリー
ガレキ等	固体廃棄物貯蔵庫	固体廃棄物貯蔵庫内に収納されているガレキ類(30 mSv/h 超)
	覆土式等	覆土式一時保管施設、容器収納にて保管されているガレキ類(1～30 mSv/h)、一時保管槽にて保管されている伐採木
	屋外集積等	屋外シート養生にて保管されているガレキ類(0.1～1 mSv/h)、屋外集積にて保管されているガレキ類(0.1 mSv/h 未満)、屋外集積にて保管されている伐採木
建屋内汚染構造物等		原子炉建屋、PCV/RPV 内で、事故により飛散した放射性物質により汚染された構造物・配管・機器等(シールドプラグ・非常用ガス処理系配管等)及び事故以前の運転時の放射化物

³ 原子力損害賠償・廃炉等支援機構、東京電力 HD(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2022(2022 年 10 月)を参考に MRI 作成

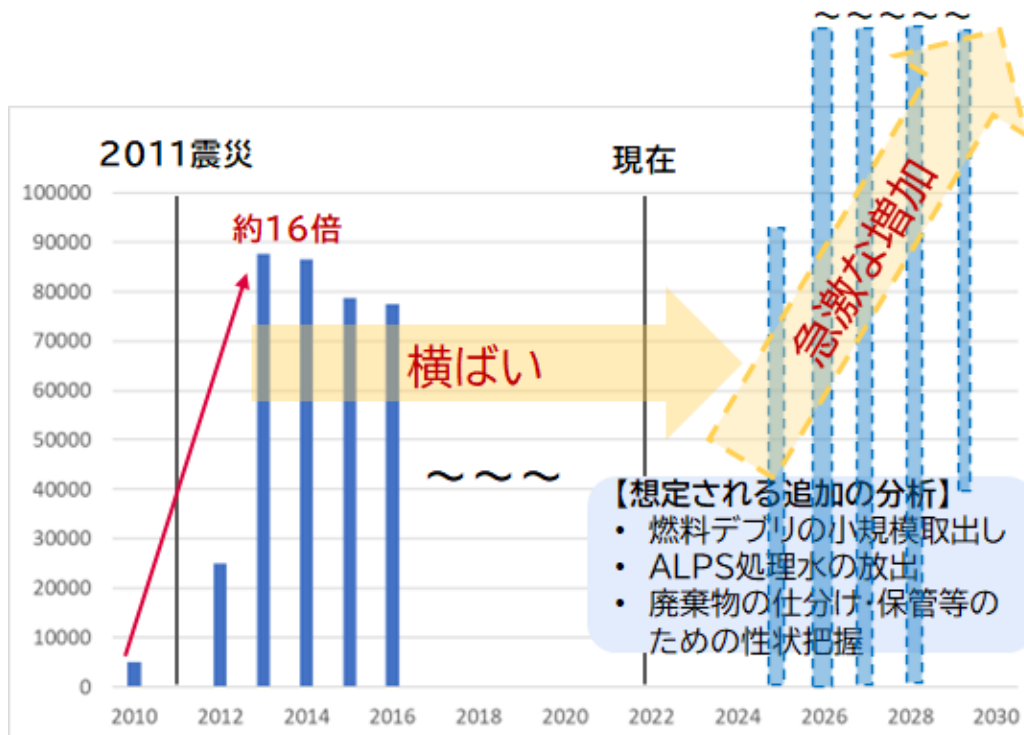


図 2-1 1F における廃棄物の分析状況および見通し⁴

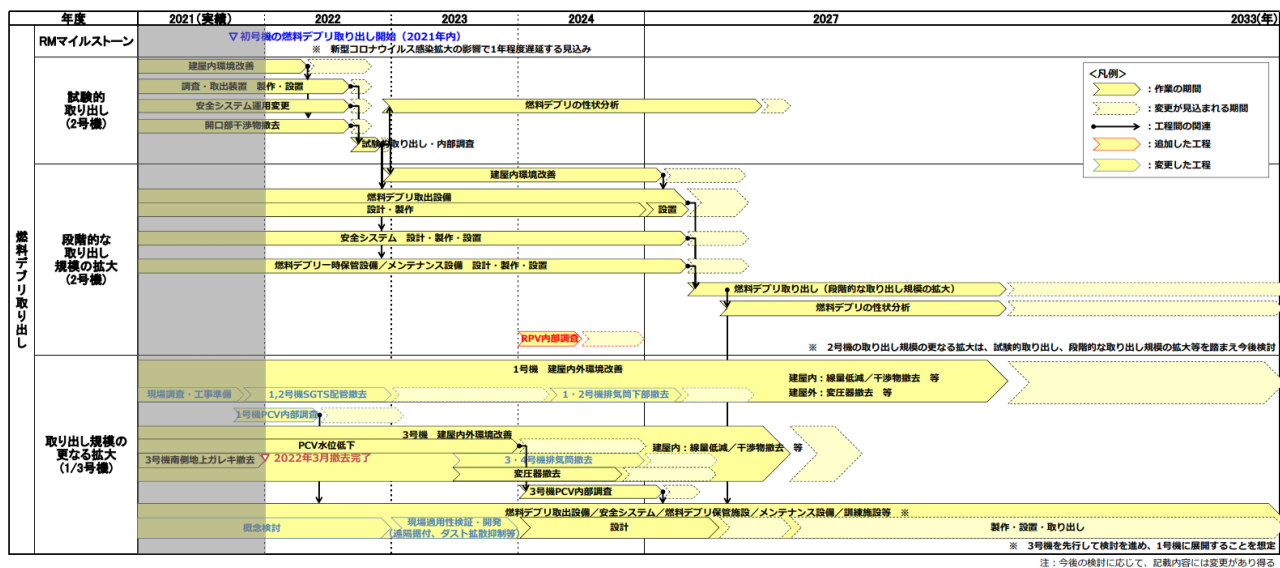
2.1.1 燃料デブリ・建屋内汚染構造物等

燃料デブリについては、安定的に冷却され、原子炉格納容器内の温度や放射性物質の放出量に大きな変動はなく、冷温停止状態が維持された準安定状態にある。中長期ロードマップ⁵で示された燃料デブリ取り出し方針と初号機の燃料デブリ取り出し方法を踏まえ、2号機での試験的取り出しの開始に向けて、東電 HD において、エンジニアリングを継続するとともに、内部調査と研究開発の継続的な実施、線量低減・水位低下・敷地確保等の現場環境整備が進められている。また、2021 年内に試験的取り出しに着手するとしていたが、世界的な新型コロナウイルス感染拡大の影響等により、2023 年度後半を目途に試験的取り出し作業に着手する工程に見直しがなされた。燃料デブリ取り出しの進め方については、試験的取り出しに着手し、その結果を踏まえて方法を検証・確認しながら段階的に取り出し規模を拡大していく、ステップ・バイ・ステップで進めていく方針が示されている⁶。さらに、燃料デブリ取り出しに向けた検討と並行して、建屋内汚染構造物等の取り出しについても検討が進められている状況にある。図 2-2 に燃料デブリ取り出しのスケジュールプランを示す。段階的に取り出し規模の拡大については、2027 年ごろが予定されており、分析量については、今後 10 年において急激な増加が発生する状況ではないことが見込まれる。

⁴ 東京電力 HD 株式会社 理事 石川 真澄、廃炉作業における分析の状況と課題について、第6回 福島第一廃炉国際フォーラム(2022 年 8 月 29 日)を参考に MRI 作成

⁵ 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議、東京電力 HD(株) 福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(令和元年 12 月 27 日)

⁶ 東京電力 HD 株式会社、「燃料デブリ等の取り出しから保管まで」の概要資料(2020 年 7 月 2 日)



2.1.2 使用済燃料

1～4号機の使用済燃料プール内の燃料については、まずは使用済燃料プールからの取り出しを進め、当面、共用プール等において適切に保管するとともに、共用プールの容量確保の観点から、共用プールに保管されている燃料を乾式キャスク仮保管設備へ移送・保管計画となっている。したがって、使用済燃料については、使用済燃料プールからの燃料取り出し作業が計画されているが、既に3号機および4号機の使用済燃料プールからの燃料取り出しが完了しており、その結果を踏まえれば今後10年において分析量や分析作業等に大きな影響を与えるものではないと考えられる。

⁷ 東京電力HD株式会社、廃炉中長期実行プラン2022(2022/3/31)

2.1.3 汚染水等

原子炉建屋、タービン建屋、その他付属建屋内に滞留している汚染水については、採取した液体試料について5年以上定期的に分析が実施されており、分析結果は東京電力HDのホームページにて公開されている⁸。したがって、汚染水については、分析量や分析作業等に大きな影響を与えるものではないと考えられる。

一方、貯蔵・保管されているALPS処理水の取扱いについては、2021年4月に決定された政府の基本方針を踏まえ、安全性の確保を大前提に、風評影響を最大限抑制するための対応を徹底するべく、設備の設計や運用等が進められている状況にある。具体的には、多核種除去設備等では取り除くことが出来ないトリチウムについては、現在排水している地下水バイパスやサブドレンのトリチウム濃度の運用目標値である1リットルあたり1500ベクレルを下回るよう、5号機の取水路から取水した大量の海水で希釈し、放水立坑・海底トンネルを通じて、沿岸から約1km先に放出することが計画されている。

海水希釈後のALPS処理水について、放出する日は毎日サンプリングし、そのトリチウム濃度が1リットルあたり1500ベクレルを確実に下回っていることを確認し、速やかに公表する方針とされている。また、海域へのトリチウムの拡散状況や魚類・海藻類などの海生生物への放射性物質の移行状況を確認するために、トリチウムを中心にモニタリングを強化する方針が示されている⁹。図2-3および図2-4に強化された海域モニタリング計画の試料採取・分析等を示す。放出開始前のトリチウムや海洋生物の状況を把握するため、2022年4月20日より試料採取・分析が開始されている状況にある。ALPS処理水の海洋放出が開始されれば、既に試料採取・分析が進められているが、分析量・作業等の実務を担う分析作業者の育成・確保が必要になることが考えられる。トリチウム等の生物に対する影響については、これまでの科学的知見等からその安全性は確認できているとされているが、ALPS処理水の海洋放出に係る理解の醸成、風評影響の抑制につなげていくためにも、モニタリング結果を透明性高く社会へ公表していくことが重要だと考えられる。

⁸ 東京電力HD株式会社、廃炉プロジェクト データ IV.滞留水・建屋内汚染水(2023年3月時点)
https://www.tepco.co.jp/decommission/data/daily_analysis/retained_water/index-j.html

⁹ 東京電力HD株式会社、多核種除去設備等処理水の取扱いに関する福島第一原子力発電所海域モニタリング計画について(2022年3月31日)

赤字：現行より強化する点

対象	採取場所 (2-3. 図1,2,3参照)	採取点数	測定対象	頻度	検出下限値
海水	港湾内	10	セシウム-134,137	毎日	0.4 Bq/L
			トリチウム	1回/週	3 Bq/L
	港湾外 2km圏内	2	セシウム-134,137	1回/週	0.001 Bq/L
				毎日	1 Bq/L
		5 → 8	セシウム-134,137	1回/週	1 Bq/L
		7 → 10	トリチウム	1回/週	1 → 0.4 Bq/L ^{*1}
	沿岸 20km圏内	6	セシウム-134,137	1回/週	0.001 Bq/L
			トリチウム	2回/月 → 1回/週 ^{*2}	0.4 → 0.1 Bq/L ^{*3}
	沿岸 20km圏内 (魚採取箇所)	1	トリチウム	1回/月	0.1 Bq/L
		0 → 10	トリチウム	なし → 1回/月	0.1 Bq/L ^{*3}
	沿岸 20km圏外 (福島県沖)	9	セシウム-134,137	1回/月	0.001 Bq/L
		0 → 9	トリチウム	なし → 1回/月	0.1 Bq/L ^{*3}

1：必要に応じて電解濃縮法^{}により検出値を得る

*2：検出下限値を0.1Bq/Lとした測定は、1回/月

*3：電解濃縮装置の設置状況により、当面は0.4Bq/Lにて実施する

※：採取深度はいずれも表層

*：トリチウム水は電気分解されにくい現象を利用した濃縮法

電解濃縮装置については参考を参照

図 2-3 強化された海域モニタリング計画(海水)

赤字：現行より強化する点

対象	採取場所 (2-3. 図1,2参照)	採取点数	測定対象	頻度	検出下限値
魚類	沿岸 20km圏内	11	セシウム134,137	1回/月	10 Bq/kg (生)
			ストロンチウム90 (セシウム濃度上位5検体)	四半期毎	0.02 Bq/kg (生)
		1	トリチウム (組織自由水型)	1回/月	0.1 Bq/L
			トリチウム (有機結合型)		0.5 Bq/L
		0 → 10	トリチウム (組織自由水型) ^{*1}	なし → 1回/月	0.1 Bq/L ^{*3}
			トリチウム (有機結合型) ^{*2}		0.5 Bq/L
海藻類	港湾内	1	セシウム134,137	1回/年 → 3回/年	0.2 Bq/kg (生)
	港湾外 2km圏内	0 → 2	セシウム134,137	なし → 3回/年	0.2 Bq/kg (生)
			ヨウ素129	なし → 3回/年	0.1 Bq/kg (生)
			トリチウム (組織自由水型) ^{*1}	なし → 3回/年	0.1 Bq/L ^{*3}
			トリチウム (有機結合型) ^{*2}		0.5 Bq/L

*1：水の状態 で存在し、水と同じように体外へ排出されるトリチウム。10日程度で放射能の半分が体外へ排出される。

*2：タンパク質などの有機物に結合して体内に取り込まれたトリチウム。多くは40日程度で体外へ排出され、一部は排出されるまで1年程度かかる。

*3：電解濃縮装置の設置状況により、当面は0.4Bq/Lにて実施する

*：電解濃縮装置については参考を参照

図 2-4 強化された海域モニタリング計画(魚類、海藻類)

2.1.4 水処理二次廃棄物・ガレキ等

2019 年 12 月 27 日に改訂された「東京電力 HD(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」では、固体廃棄物の保管管理について、「2028 年度内までに、水処理二次廃棄物及び再利用・再使用対象を除くすべての固体廃棄物(伐採木、ガレキ類、汚染土、使用済保護衣等)の屋外での保管を解消し、作業員の被ばく等のリスク低減を図る。」ことが目標工程とされている。水処理二次廃棄物については、保管施設を設置し、屋外での一時保管を可能な限り解消していく計画としている。なお、建屋内への保管に移行するに際しては、廃棄物の性状に応じて適宜減容処理または安定化処理が検討・実施される計画である。また、ガレキ等については、可能な限り減容した上で建屋内保管へ集約し、固体廃棄物貯蔵庫外の一時保管エリアを解消していく計画としている。図 2-5 に 2023 年 2 月改訂版保管管理計画の概要(ガレキ等、水処理二次廃棄物)を示す。

福島第一原子力発電所の事故後に発生した固体廃棄物は、通常の発電所で発生した廃棄物と性状が異なることから、将来の保管管理・処理・処分を見据え、様々な観点で性状把握を進めておく必要がある。現在、性状把握を進めるために分析施設の整備等が進めているところであり、分析体制等が整い次第、分析を加速させる計画となっている。図 2-6 に固体廃棄物の性状把握の進め方と分析試料数を示す。今後 10 年において分析量や分析作業等に大きな影響があると考えられ、分析量・作業等の実務を担う分析作業者の育成・確保が重要であると考えられる。

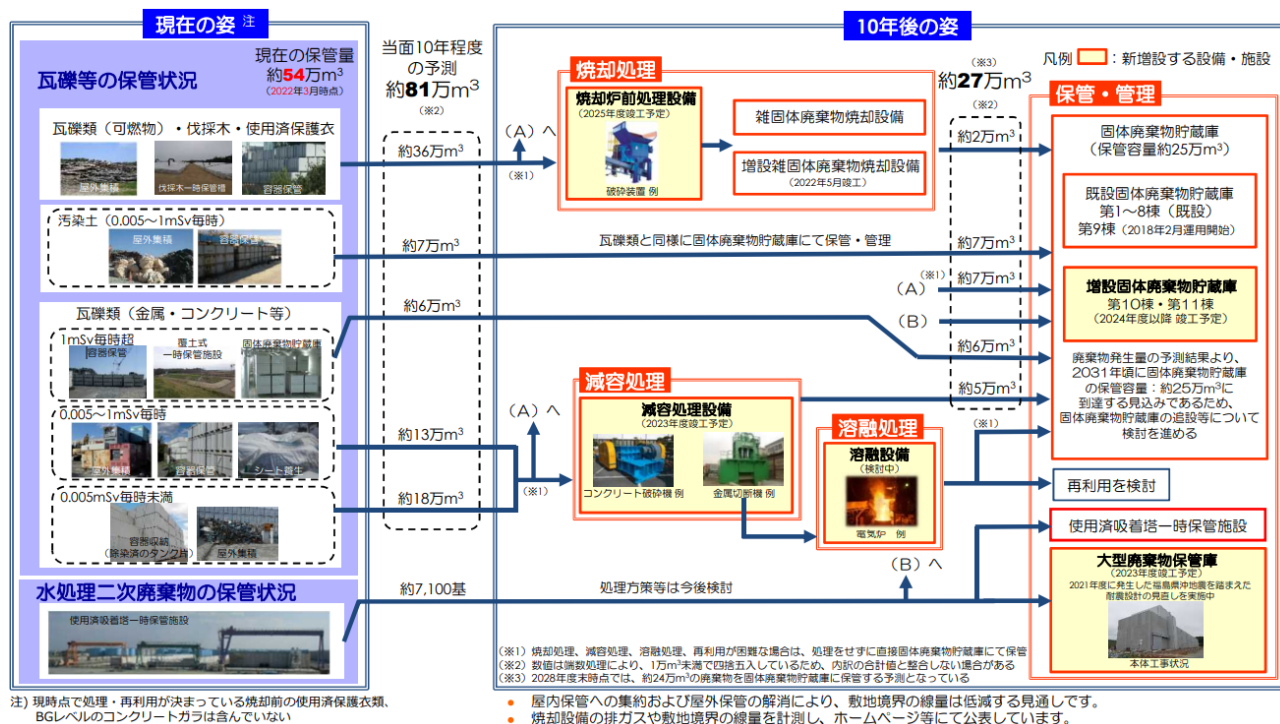


図 2-5 2023 年 2 月改訂版 保管管理計画の概要(ガレキ等、水処理二次廃棄物)¹⁰

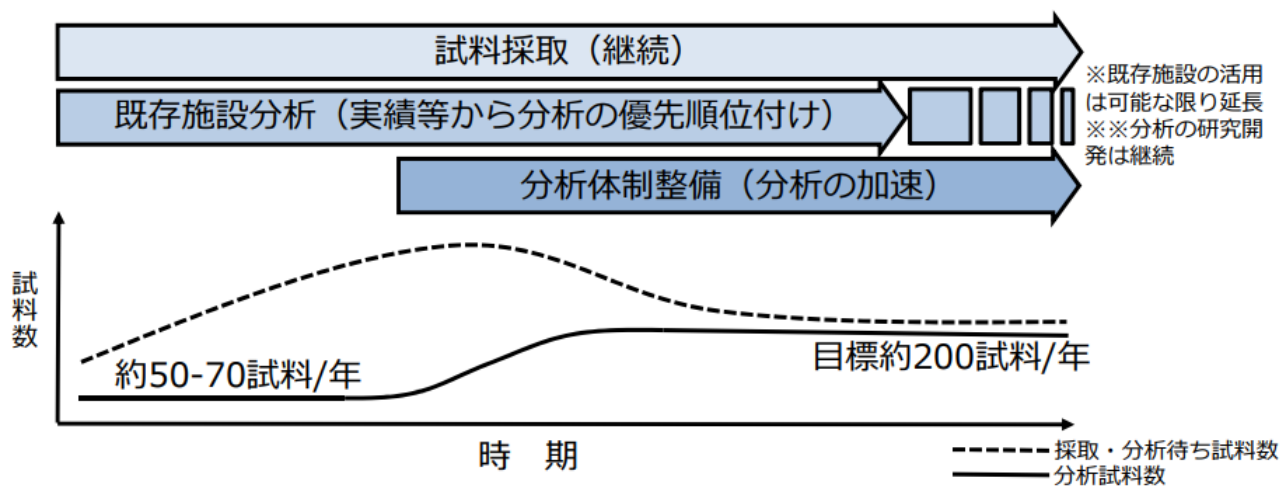


図 2-6 固体廃棄物の性状把握の進め方と分析試料数¹¹

¹⁰ 東京電力 HD 株式会社、東京電力 HD(株) 福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画 2023 年 2 月版(2023 年 2 月 22 日)

¹¹ 東京電力 HD 株式会社、福島第一原子力発電所 固体廃棄物の保管管理計画 ~2021 年度改訂について(2021 年 9 月 13 日)

2.2 分析手法についての検討・特定

本事業では、国として 1F に係る廃炉を滞りなく進め、ひいては今後の国内における廃止措置事業にも資するため、短期間で画一的に高いレベルを持った放射性物質の分析人材を大量に育成することを目的としていることから、1F において実際に使用されている分析手法などを調査した。表 2-2 に 1F において使用されている分析手法および対象核種を示す。ALPS 処理水中の核種の放射能濃度の分析方法を参考に調査を実施したが、今後計画されているガレキ等の分析においても同様の分析手法が使用されることが考えられる。

表 2-2 1F において使用されている分析手法および対象核種¹²

分析手法	概要	主な対象核種
Ge 半導体検出器	均一化した試料をマリネリ容器に分取し測定する。	Cs-137, Co-60 など
低バック液体シンチレーションカウンタ	対象核種を単離し、試料とシンチレータを混合し測定する。	H-3 など
ICP-MS (誘導結合プラズマ質量分析)	試料を希硝酸等で希釈し測定する。	Li, Co Y など
β 核種分析装置	レジンにより単離し、沈殿回収したものをマウントし、ステンレス皿にて β -Spec 測定する。	Sr-90
ZnS シンチレーションカウンタ	試料を鉄共沈させ除鉄した後、ステンレス皿に蒸発乾固し測定する。	Am-241 などの α 線核種

3.2 節における福島第一原子力発電所の主要なリスク源と廃棄物の調査において、今後 10 年において分析量や分析作業等に大きな影響があると考えられ、分析量・作業等の実務を担う分析作業者の育成・確保が重要となりそうな廃炉作業として、ALPS 処理水の海洋放出およびガレキ等の建屋内への保管を特定した。ALPS 処理水およびガレキ等の分析対象核種、並びに、準拠する公定法や公開文献等を踏まえて、本育成カリキュラムで取り扱うべき分析手法については、R5 年度に優先して実施すべきものとして、①Ge 半導体検出器、②低バック液体シンチレーションカウンタ、③ICP-MS の3つの分析手法を検討・特定した。なお、 α 核種の分析については、必要性は高いが、有識者へのヒアリング結果等から、育成対象を明確化して上で、優先順位を下げる判断とした。また、 β 核種分析装置による Sr-90 の分析についても同様の判断とした。ただし、来年度以降の研修によって分析作業者の研修を実施することで、燃料デブリ取り出しに向けて分析作業者の技術能力の向上を中長期的に図っていくことが必要不可欠であることから、緊急性は高くはないが来年度以降に整備を進め行くことが望ましいと考えられる。表 2-3 に研修対象とする分析手法の調査・特定のまとめを示す。IRID、JAEA および東京電力等による先行研究を参考に、分析ニーズが高い(分析数が多い、不足している分析作業者の育成が急務)と想定される対象物、対象核種を特定し、カリキュラムを作成した。

¹² 東京電力 HD 株式会社、ALPS 処理水希釈放出設備及び関連施設の新設について(2022 年 2 月 7 日)を参考に MRI 作成

表 2-3 研修対象とする分析手法の調査・特定のまとめ

調査項目	内容
分析対象物と 分析対象核種	● 固体廃棄物(がれき類、伐採木、土壌、金属、コンクリート) γ 核種: Cs-137 β 核種: H-3, Sr-90 ● 液体廃棄物(海水サンプル、魚類・海藻類) γ 核種: Cs-137, H-3, Sr-90, (I-129) ※本事業(R4年度)のカリキュラム作成では優先度の高い固体廃棄物(伐採木、土壌)、液体廃棄物(海水サンプル)の作成を実施した。
分析方法	● γ 核種: Ge 半導体検出器(内部循環型冷却の最新式の利用を想定) ● β 核種: 液体シンチレーション検出器(HITACHI LSC-LB8(低バックグラウンド型)の利用を想定) ● その他難測定核種: ICP-MS(質量分析器: Agilent 8900 Triple Quadの利用を想定)
育成(研修実施)対象	● 民間企業従業員(主に高校卒、高専卒の分析作業者) ● 学生 を対象とし、福島県浜通り地域に拠点を置く施設にて研修を実施。分析方法とその前処理の基礎習得をターゲットとする。

3. 効率的・効果的な研修方法の検討

本章では、2 章で特定した育成カリキュラムで取り扱うべき分析手法について、効率的かつ効果的な研修となるような研修実施方法を検討した。具体的には現場で使える力量(competence)を目標として、分析手法の原理等の知識(knowledge)、分析手法の取扱い等の技能(skill)、1F の廃炉における分析の重要性理解等の姿勢(attitude)を、座学×体験型学習による統合的アプローチによる研修実施方法を検討した。

座学のメリットである多くの情報の伝達による受講者側からは「教わる」という受動的な研修に加えて、体験型学習のメリットである主体性と協働による受講者側の「学ぶ」という能動的な研修の組み合わせによる研修実施方法を検討した。

分析作業に関する「知識(knowledge)」および「技能(Skill)」を醸成する研修を実施する上では、一般的な文章ベースの「分析の手順書」の整備でなく、分析の流れや実際の作業の状況、使用する試薬や分析の過程における試料の状態変化等を画像等も含め視覚的にも理解・取得しやすい手順書を整備することが有用である。分析に臨む「姿勢(Attitude)」の醸成においては、廃炉廃棄物の分析の必要性・重要性、課題の適切な理解が重要である。

本事業で整備する研修カリキュラムには、分析作業の技術的な内容のみならず、研修の意義、背景等の説明を含め、研修を受講する目的や目標を明確化することで、今後福島県内での分析作業の必要性・重要性や廃棄物の課題等の理解を深化することに努めた。

3.1 分析人材に対する研修要件

効率的・効果的な研修方法の策定に向けて、研修が目指すべき分析人材の育成目標及び研修が実施すべき育成項目の2つを整理した。

3.1.1 分析人材の育成目標

原子力損害賠償・廃炉等支援機構(以下、NDF)に設置されている廃炉研究開発連携会議¹³では、1F 廃止措置における分析人材の確保・育成を重要な課題として認識しており、分析実施に係る体制を検討している。図 3-1 に、同会議において議論されている化学分析のあるべき体制を示す¹⁴。「分析データ評価者」は、燃料デブリや廃棄物の分析に当たり、その方針を策定し、得られた分析データからその分析方針を再評価する。「分析作業管理者」は分析作業時の、安全確保及びデータの信頼性確保のための管理を行う。「分析作業者」はマニュアルに基づき正しく分析を行う。また、「分析技術者」は、分析要求事項に基づき分析方法の開発・提供を行う。本育成事業の対象範囲は、分析所での作業を実施する「分析作業管理者」及び「分析作業者」とする。その上で分析作業者を3段階(初級、中級、上級)に分類し、分析管理作業者(特級)を加えた計4段階の中で各段階における育成目標を検討した。以下に各段階に対する育成目標を示す。

¹³ 原子力損害賠償・廃炉等支援機構「廃炉研究開発連携会議」 <https://www.dd.ndf.go.jp/decommissioning-research/>

¹⁴ 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 第10回廃炉研究開発連携会議 資料3-2-1 <https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/decommissioning-research/dr-committee/materials/10/doc3-2-1.pdf>

- 初級資格;実務的な能力として「上級資格を有する管理者等より与えられた機器分析の課題について、機器分析の定められたプロセス(SOP)に沿って分析の操作が一通り出来る」ことが基準
高校の化学・物理の指導要綱程度の基礎知識を既にマスターし、これに加え最小限必要な分析に関する知識と技能を有することが望まれる。
- 中級資格;「与えられた機器分析の課題の意味を理解し、自らの専門とする分析手法を用いて分析を行うことができる」ことが基準
(課題の解決のために最適な分析手法を選択できる技術は問わないが、自らの専門とする分析手法について SOP を作成できることが望ましい。)
分析化学を専攻した大学卒業者と同等以上の知識と技能を持つことが期待される。
- 上級資格;2 つ以上の手法について一定の専門知識と実務経験を持っていること。
- 特級資格;「機器分析を日常的に実施することが出来る作業者の育成と現代社会で機器分析が果たす役割や機能について啓蒙をすることができる」ことが基準
分析の継承については分析対象に対する分析手法の位置づけや1F 廃炉における機器分析の果たすべき機能等、普及については後継者への指導や初心者向けの指導や啓蒙、関連組織との調整等にあたり必要な見識を持っていること。

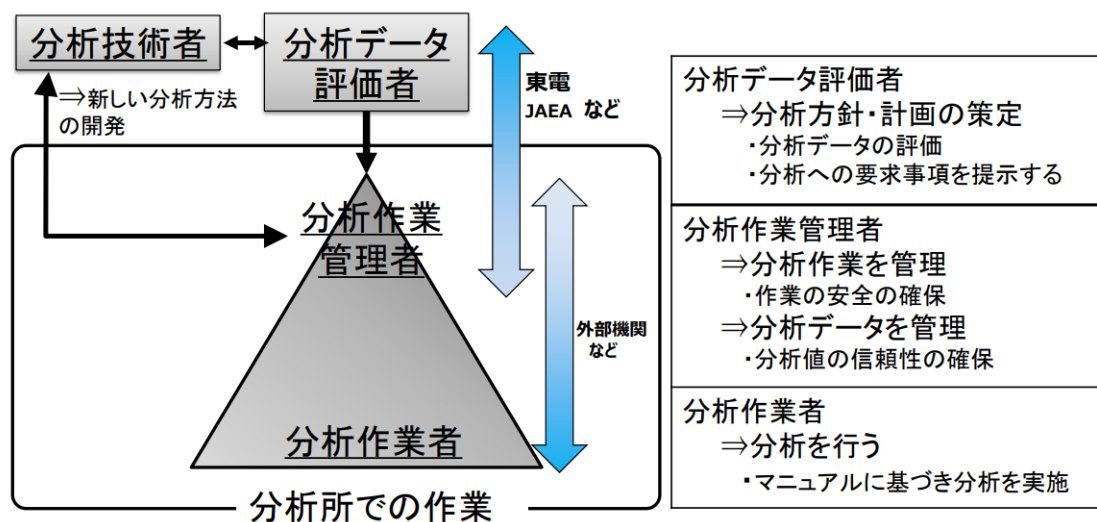


図 3-1 化学分析におけるあるべき体制(例)

3.1.2 分析人材の育成項目(研修カリキュラム(案))

分析に係る人材の育成において、分析作業者及び分析作業管理者による分析に係る能力を把握するため、一般的に求められる力量の要素を整理した。図 3-2 に分析作業者及び分析作業管理者に求められる力量要素の整理を示す。JIS Q 9000:2015¹⁵等を踏まえると、“力量(competence)”は“知識(knowledge)“や”技能(skill)“を適用する能力という意味をもっており、加えて、力量を発揮するという観点から”姿勢(attitude)“も重要な力量要素として設定している。

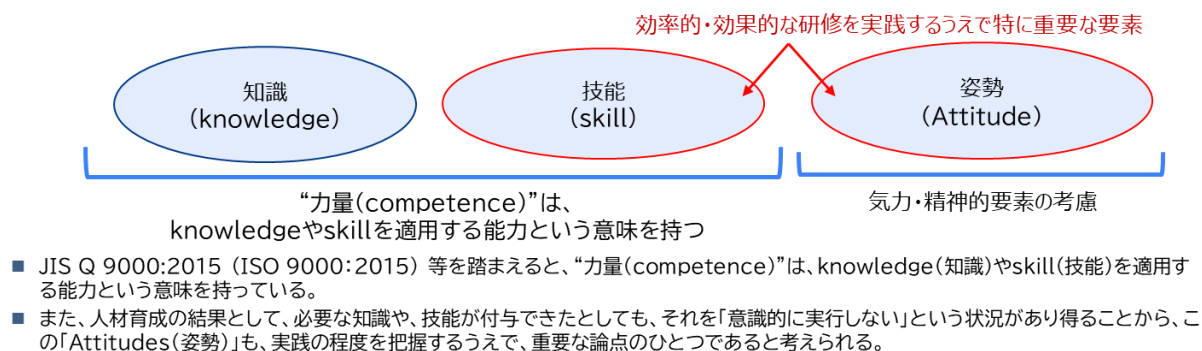


図 3-2 分析作業者及び分析作業管理者に求められる力量要素の整理

上記の整理を踏まえて座学的な分析に係る知識習得のみならず、実際に分析装置や試料の前処理等の実作業を体験し、技能として取得できるような研修カリキュラムを検討、さらには、今後の廃止措置に伴う廃棄物の分析の重要性やこれに伴う地元産業育成の必要性等の背景情報も研修カリキュラムに組み込み、分析作業に対する姿勢の醸成も含めた、統合的な研修カリキュラムの整備を行うこととした。

研修カリキュラムにおいて、本育成事業の対象となる分析人材は、第 2 章で抽出した分析手法に関する分析手順の技能を身に付けることに加えて、放射化学分析に必要な放射線、放射能及び被ばくといった基礎的な知識の習得、分析人材としての姿勢を身に付けるための分析における留意事項や福島第一原子力発電所における放射化学分析の重要性等をカリキュラムに組み込むこととした。知識・技能・姿勢の要素から整理した研修カリキュラム案を表 3-1 に示す。

¹⁵ JIS Q 9000:2015 <https://kikakurui.com/q/Q9000-2015-01.html>

表 3-1 整備すべき研修カリキュラム(案)

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> (1) 放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む) (2) 環境放射能や産業利用に関する知識 (3) 放射線の生物影響と被ばくに関する知識 (4) リスクコミュニケーションに関する知識と姿勢 (5) 放射線防護に関する意識や知識 (6) 放射性廃棄物の運搬・保管、処分にに関する知識 (7) 放射化学分析に必要な知識や技能(化学分析の作業も含む) (8) 試料採取および前処理に必要な知識や技能(化学分離を含む) (9) 廃液や二次廃棄物の発生量低減に関する知識や姿勢 (10) 検体取り違い防止やコンタミネーション防止に関する知識や姿勢 (11) 分析装置と操作方法(校正を含む)に関する知識や技能 (12) 測定データの解析(スペクトロメトリーと計算を含む)と評価に関する知識や技能 (13) 分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢 (14) 福島第一原子力発電所と分析の重要性に関する知識や姿勢(分析計画も含む) (15) 福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む) (16) 他分析者との交流・意見交換と情報収集の重要性に関する知識や姿勢 |
|---|

表 3-1 の研修カリキュラム(案)を力量要素に応じた分類にしたものを表 3-2 に示す。基礎的な知識を網羅するとともに、知識に偏ることなく、技能や姿勢に係る項目を一定数設けることで、先に整理した、分析作業者及び分析作業管理者に求められる力量(コンピーテンス)が得られる。

表 3-2 整備するカリキュラム(案)(力量要素に応じた分類)

知識 (knowledge)	技能 (skill)	姿勢 (Attitude)
(1)放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む) (2)環境放射能や産業利用に関する知識 (3)放射線の生物影響と被ばくに関する知識 (6)放射性廃棄物の運搬・保管・処分に関する知識	(7)放射化学分析に必要な知識や技能(化学分析の作業も含む) (8)試料採取および前処理に必要な知識や技能(化学分離を含む) (12)測定データの解析(スペクトロメトリと計算を含む)と評価に関する知識や技能	
要素横断的なカリキュラム		
(4)リスクコミュニケーションに関する知識や姿勢 (5)放射線防護に関する知識や姿勢 (9)廃液や二次廃棄物の発生量低減に関する知識や姿勢 (10)検体取り違い防止やコンタミネーション防止に関する知識や姿勢 (11)分析装置と操作方法(校正を含む)に関する知識や技能 (13)分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢 (14)福島第一原子力発電所と分析の重要性に関する知識や姿勢(分析計画も含む) (15)福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む) (16)他分析者との交流・意見交換と情報収集の重要性に関する知識や姿勢		

本年度事業においては、知識要素から「(1)放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む)」及び「(6)放射性廃棄物の運搬、保管、処分に関する知識」、姿勢要素から「(13)分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢」、「(15)福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む)」について、研修カリキュラム内容の素案を作成した。このうち、技能要素については、各項目をカバーした分析手法ごと(ICP-MS、液体シンチレーション、Ge 半導体検出器)のカリキュラムを作成した(3.3 節)。

(1) 放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む)

研修カリキュラム「(1)放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む)」におけるカリキュラム内容案及びカリキュラム作成に係る参考文献を表 3-3 及び表 3-4 に示す。被ばく、遮へいについては、研修カリキュラム「(3)放射線の生物影響と被ばくに関する知識」及び「(5)放射線防護に関する意識や知識」に含むものとしており、放射線計測(検出原理や測定方法)については、「(7)放射化学分析に必要な知識や技能(化学分析の作業も含む)」及び「(11)分析装置と操作方法(校正を含む)」に関する知識や技能」に含まれるものとしている。表 3-3 におけるカリキュラム内容案について、表 3-4 の参考文献①が体系的にまとめられており、これを基本に参照する。

表 3-3 「放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む)」のカリキュラム内容案

項目	
1	放射能、放射線、放射性物質
2	放射線の種類と性質、単位
3	壊変と放射線、親核種・娘核種
4	原子核の安定・不安定、様々な原子核
5	自然由来・人工由来
6	半減期と放射能の減衰
7	電離放射線と非電離放射線(電離放射線の種類、電磁波の仲間)

表 3-4 「放射線と放射能に関する知識(壊変やコンプトン効果も含む)」の参考文献

①「放射線による健康影響に関する統一的な基礎資料」、環境省

<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/rlkisoshiryo/rlkisoshiryohtml.html>

第1章放射線の基礎知識

<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/rlkisoshiryo/rlkiso-01index.html>

②「放射線と放射能」、電事連

<https://www.fepc.or.jp/nuclear/houshasen/houshanou/index.html>

③「原子力・エネルギー図面集 第6章 放射線」、日本原子力文化財団

https://www.ene100.jp/zumensyu_6

(2) 放射性廃棄物の運搬、保管、処分に関する知識

研修カリキュラム「(6)放射性廃棄物の運搬、保管、処分に関する知識」におけるカリキュラム内容案及びカリキュラム作成に係る参考文献を表 3-5 及び表 3-6 に示す。放射性廃棄物の運搬に関する内容については総務省消防庁の資料(A②及び A②-1)がよくまとめられており、それらにアイソトープ協会資料(A①等)及び国交省資料(A④等)を補助的に用いることで作成可能である。放射性廃棄物の保管に関する内容については、低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物を区分しつつ、具体的な保管方針として東京電力 HD の福島第一原子力発電所における保管(B⑥)を整理することで作成可能である。放射性廃棄物の処分については、資源エネルギー庁や日本原燃によってまとめられている資料(C①及び C②)をもとにした低レベル廃棄物の処分から原子力発電環境整備機構によってまとめられている資料(C⑥)をもとにした高レベル廃棄物の処分等を整理することで作成可能である。

表 3-5 「放射性廃棄物の運搬、保管、処分に関する知識」のカリキュラム内容案

項目	
A. 運搬(輸送)	
(1)	放射性物質の運搬 (概要、輸送物の外観)
(2)	輸送物の区分
(3)	輸送の安全規則に係る法体系
(4)	輸送容器の基準
B. 保管	
(1)	放射性廃棄物とは
(2)	低レベル放射性廃棄物
(3)	高レベル放射性廃棄物
(4)	研究施設での保管
(5)	福島第一原子力発電所における保管
C. 処分	
(1)	低レベル廃棄物の処分
(2)	中深度処分と余裕深度処分
(3)	高レベル廃棄物の処分
(4)	クリアランス物の処分(再利用)

表 3-6 「放射性廃棄物の運搬、保管、処分にに関する知識」の参考文献

A①「放射性輸送物の運搬」、日本アイソトープ協会 HP
https://www.jrias.or.jp/yusou/
A①－1「放射線防護計画等に関する運送事業者等との勉強会のまとめ」、H21 年3月、日本アイソトープ協会
https://www.jrias.or.jp/yusou/pdf/602.pdf
A①－2「アイソトープ輸送ガイド」、日本アイソトープ協会
https://www.jrias.or.jp/books/pdf/yusoguide_201809_n.pdf
A②「スタート RI119 消防職員のための放射性物質事故対応の基礎知識」、総務省消防庁 HP、H27 年3月（一部改訂）
https://www.fdma.go.jp/disaster/higashinihon/item/higashinihon002_08_01_houdoushiryoku.pdf
A②－1「附属資料」
https://www.fdma.go.jp/pressrelease/houdou/items/h23/2303/230318_2houdou/fuzokusiryoku/02.pdf
A③「放射性物質の輸送規則について」、国土交通省
https://www.mlit.go.jp/notice/noticedata/pdf/201701/00006357.pdf
A④「放射性輸送物について」、国土交通省
https://www.mlit.go.jp/common/000026606.pdf
B①「廃棄物の区分」、原子力文化財団 HP
https://www.ene100.jp/zumen/8-1-1
B②「原子力発電所の廃棄物処理方法」、電事連 HP
https://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/zumen/8-1-3.jpg
B③「高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の貯蔵概念図」、原子力文化財団 HP
https://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/zumen/8-3-4.jpg
B④「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターについて」、日本原燃 HP
https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/hlw/summary/
B⑤「廃棄物対策」、東京電力 HP
https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/waste/
B⑥－1「固体廃棄物の保管管理計画（2023 年2月版）」、東京電力 HP
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2023/d230222_09-j.pdf#page=41
C①「放射性廃棄物について」、資源エネルギー庁 HP
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html
C②「埋設事業の概要」日本原燃 HP
https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/
C③「中心度処分に係る規制基準の検討状況について」、原子力規制庁基盤技術課山田氏、2018 年9月2

0日、自然放射性核種を含む廃棄物の放射線防護に関する専門研究会シンポジウム

<https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000117642/000258864.pdf>

C④「放射性廃棄物の埋設処分に係る安全規制支援研究 ―地層処分と中深度処分―」、塚本他、Vol.47、No.3、2017、日本水文科学会誌

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jahs/47/3/47_163/_pdf

C⑤「中深度処分の規制基準の背景及び根拠」、NTEN-2022-0001、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、2022 年8月

<https://www.nra.go.jp/data/000402746.pdf>

C⑥「高レベル放射性廃棄物の地層処分について」、NUMO

<https://www.numo.or.jp/pr->

[info/to_media/pdf/houshaseihaikibutsu_shobun_20220519.pdf](https://www.numo.or.jp/pr-info/to_media/pdf/houshaseihaikibutsu_shobun_20220519.pdf)

C⑦「廃炉からごみをリサイクルできるクリアランス制度」、資源エネルギー庁 HP

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/clearance.html>

C⑧「クリアランス制度について」、中国電力、2019 年7月 25 日

https://www.city.izumo.shimane.jp/www/contents/1564365135961/files/shiryou4_komon5.pdf

(3) 分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢

研修カリキュラム「(13)分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢」におけるカリキュラム内容案及びカリキュラム作成に係る参考文献を表 3-7 及び表 3-8 に示す。産業技術総合研究所や経済産業省の資料(A①及びA④)を参照し測定技術の信頼性に関する基礎的な情報を整理しながら、分析データの信頼性確保のためには、測定技術の信頼性(正確な計測器、正しい使い方、測定者の技能)と並んで、品質管理(成果物が満足できるものであるように管理すること)及び品質保証(成果物が満足できるものであることを受益者が確信できること)が重要であることをまとめる。

表 3-7 「分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢」のカリキュラム内容案

項目	
1	信頼性の必要性
2	信頼性を支える基礎
3	分析の信頼性に影響する要因
4	信頼性のための条件
5	分析データの信頼性確保のための品質とは
6	品質管理、品質保証、品質マネジメントシステム
7	ISO9001(JISQ9001)とは
8	品質管理のための PDCA
9	文書とは(品質体系、記録)

表 3-8 「分析データの信頼性確保や記録・文書化に関する知識や姿勢」の参考文献

A①「放射線計測の信頼性について」、産総研・計量標準総合センターHP
[https://unit.aist.go.jp/nmij/info/IR\(J\)/](https://unit.aist.go.jp/nmij/info/IR(J)/)

A②「放射線計測の基本と信頼性」、平井(都市大名誉教授)、JST 理事長定例記者説明会資料、2013.3.27
https://www.jst.go.jp/pdf/pc201302_hirai.pdf

A③「試験結果の信頼性と基準認定制度」、小野(産総研特別顧問)、2013.3.11、JNLA15周年シンポジウム
<https://www.nite.go.jp/data/000001575.pdf>

B①「JISQ9001:2015」(ISO9001:2015)、品質マネジメントシステム－基本及び用語－

B②「JISQ9001:2015」(ISO9001:2015)、品質マネジメントシステム－要求事項－

B③「品質管理(QC)と品質保証(QA)との違いとは?」、AISA-AD 社 HP
<https://products.sint.co.jp/aisia-ad/blog/difference-between-quality-assurance-and-quality-control>

B④「どこがどう違う? 「品質保証」と「品質管理」」、KEYENCE 社 HP
https://www.keyence.co.jp/ss/general/manufacture-tips/qa_qc.jsp

B⑤「ISO9001(品質)」、日本品質保証機構
https://www.jqa.jp/service_list/management/service/iso9001/
 ※ISO の基礎知識
https://www.jqa.jp/service_list/management/management_system/index.html

B⑥「JEAC4111-2021 原子力安全のためのマネジメント規程」
<https://nusc.jp/jeac/4111/jeac4111-2021.html> (概要・目次のみ)

B⑦「JEAG4121-2015 原子力安全のためのマネジメント規程(JEAG4111-2013)の適用指針」
<https://nusc.jp/jeac/4121/jeag4121.html> (概要・目次のみ)

B⑧「JEAG4121-2015[2018 年追補版] 原子力安全のためのマネジメント規程(JEAG4111-2013)の適用指針」
<https://nusc.jp/jeac/4121/jeag4121-2018amend.html> (概要・目次のみ)

B⑨「JEAC4111-2021 の位置づけ 外部説明用資料」、日本電気協会・原子力規格委員会・品質保証分科会、2022.3.3
<https://www2.nra.go.jp/data/000383429.pdf>

(4) 福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む)

研修カリキュラム「(14)福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む)」におけるカリキュラム内容案及びカリキュラム作成に係る参考文献を表 3-9 及び表 3-10 に示す。東京電力 HD の資料を中心に参照し、福島第一原子力発電所事故についての概要や原因、教訓等を取りまとめる。また、今後の取り組みについては、資源エネルギー庁の資料等を中心にとりまとめる。また、放射性物質の管理状況については、福島第一原子力発電所構内と構外で区分し、それぞれ東京電力 HD の資料、環境省の資料を参照し、とりまとめる。最後に ALPS 処理水の海洋放出についても、東京電力 HD や復興庁、環境省等の資料、ポータルサイト等を基に情報を収集し、とりまとめる。

表 3-9 「福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む)」のカリキュラム内容案

項目	
1	事故の概要
2	事故の原因
3	教訓と安全強化策
4	廃炉への取り組み
5	廃炉の見通し
6	放射性物質の管理状況(1F 構内)
7	放射性物質の管理状況(1F 構外)
8	ALPS 処理水の海洋放出

表 3-10 「福島第一原子力発電所の事故と汚染に関する知識や姿勢(過去の分析結果も含む)」の参考文献

A①—1東電の事故調査報告書、2012 年 6 月 20 日	https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_investigation/index-j.html
A①—2「福島第一原子力発電所事故の概要」、東電 HP	https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/review/review1_1-j.html#:~:text=%E5%8E%9F%E5%AD%90%E7%82%89%E5%86%85%E3%81%AE%E7%87%83%E6%96%99,%E6%B0%B4%E7%B4%A0%E3%81%8C%E7%99%BA%E7%94%9F%E3%81%97%E3%81%BE%E3%81%97%E3%81%9F%E3%80%82
A①—3「福島第一原子力発電所1～3号機の事故の経過の概要」、東電 HP	https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2_1-j.html
A②—1「福島第一原子力発電所1～3号機の事故の経過と教訓 および 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策について」、東電 HP、平成 24 年 12 月 14 日	https://www.tepco.co.jp/cc/press/betul2_j/images/121214j0102.pdf
A②—2「柏崎刈羽原子力発電所の安全対策」、東電 HP	https://www.tepco.co.jp/niigata_hq/kk-np/safety/index-j.html
A②—3「4章 原子力施設の規制と安全性向上対策」、原子力文化財団 HP	https://www.jaero.or.jp/sogo/list/cat-04.html
B①—1「福島第一原子力発電所 廃炉の進捗状況」、第20回原子力改革監視委員会、2022年9月 15 日	http://www.nrmc.jp/report/_icsFiles/afieldfile/2022/09/15/2.pdf
B①—2「あれから10年、202 年の福島」「今」、資源エネルギー庁 HP	https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/fukushima2021_02.html
B①—3「廃炉への取り組み」、原子力文化財団 HP	https://www.jaero.or.jp/sogo/detail/cat-06-01.html
B②—1「東京電力 HD(株) 福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」、廃炉・汚染水対策関係閣僚会議、R1年 12 月 27 日	https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20191227.pdf
B②—2「技術戦略プラン 2022」、NDF	https://www.dd.ndf.go.jp/strategic-plan/index2022.html
B②—3「廃炉中長期実行プラン2022」、東電、2022.3.31	

<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2022/03/4-4-1.pdf>

B②—4「廃炉・汚染水・処理水対策の概要」、廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合/事務局会議、2023,2,22

https://www.tepco.co.jp/decommission/information/committee/roadmap_progress/pdf/2023/d230222_05-j.pdf

B③「福島第一原子力発電所構内の線量状況について」、東電、2021.4.27

<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2021/04/index.html>

C①「除染情報サイト」、環境省

http://josen.env.go.jp/about/method_necessity/decontamination.html

C②「除染作業の流れ」、福島県

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/03josen-nagare.html>

C③—1「中間貯蔵施設情報サイト」、環境省

<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/>

C③—2「中間貯蔵事業について」、福島県

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16045d/>

C③—3「中間貯蔵事業」JESCO

<https://www.jesconet.co.jp/interim/understand.html>

D①「処理水ポータルサイト」東電 HP

<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/>

D②「ALPS 処理水の処分に係る基本方針」、廃炉・汚染水・処理水対策チーム事務局資料2,令和 3 年6月

<https://www.env.go.jp/content/900544139.pdf>

D③「ALPS 処理水について」、復興庁 HP

<https://www.fukko-pr.reconstruction.go.jp/2018/fukushimanoima/radiation/alps/>

D④「ALPS 処理水に係る海域環境モニタリング」、環境省 HP

<https://www.env.go.jp/water/shorisui.html>

D⑤「海洋生物の飼育試験」、東電 HP

<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/breedingtest/w2.nra.go.jp/data/000383429.pdf>

3.2 研修方法の検討

3.1 節の育成目標及び育成項目の検討結果を踏まえて、それらを実施する研修方法について検討した。表 3-11 に研修実施方法の分類とそれらの活用戦略(案)を整理した。本育成事業の目的は、分析作業者を目指す育成対象が少なくとも初級資格の力量を取得した上で、現場での実践的な OJT に対応できる段階までをフォローすることである。タイムパフォーマンス等の観点からは、座学研修やオンライン講習が効率的・効果的な研修にもなり得るが、技能や姿勢の習得の観点からは、より実践に近い形が効率的・効果的な研修方法として求められるため、選抜者向け集中研修を取り入れた研修カリキュラムを作成することとする。

表 3-11 研修実施方法と研修の狙い、研修効果の測定に関する検討

方法	概要	研修の狙い
OJT	実務中での分析スキルの実践をメンター(トレーナー)が伴走型で指導する。	現場実務の実践環境下で活かせる技能を養う。
選抜者向け集中研修	一定の力量を有すると判断された限られた教育対象者に対し、ワークショップや集中的な研修を行う。	現場実務の模擬的環境下で、適切な技能および姿勢を理解する。
座学研修	教育対象者を絞らず、多数の対象者に対し、力量向上に向けた講義形式での研修を行う。	基礎的な知識の理解と姿勢を醸成する。
オンライン講習 (e-learning)	教育対象者を絞らず、多数の研修者に対し、力量向上に向けた e-learning コンテンツを提供し、自主学習としての研修を行う。	最低限必要な知識および姿勢を取得する。

3.3 各分析手法における研修プログラムの作成

前章で特定した育成カリキュラムで取り扱うべき分析手法(ICP-MS、液体シンチレーション及び Ge 半導体検出器)について、研修プログラムを作成し、各プログラムにおいて必要な要素を整理・検討した。本節における各分析手法の研修カリキュラム作成では 3.1.2 項で検討したカリキュラム案に基づいて、「(7)放射化学分析に必要な知識や技能(化学分析の作業も含む)」、「試料採取および前処理に必要な知識や技能(化学分離を含む)」及び「(11)分析装置と操作方法(校正を含む)」に関する知識や技能」に対応させた。

3.3.1 ICP-MS

(1) 研修カリキュラム(案)と分析手順

ICP-MS における研修カリキュラム(案)と分析手順(フロー)を表 3-12 及び図 3-3 に示す。本研修カリキュラムでは、ICP-MS で海水試料中のウラン²³⁸濃度を測定することとしてカリキュラムを策定した。また、検量線法、内部標準法、標準添加法といった測定方法の中で内部標準法による測定方法を整理した。分析フローについては放射能測定シリーズ「ウラン分析法¹⁶⁾」を参照して作成した。

(2) 分析に必要な知識や技能(化学分析の作業を含む)

ICP-MS における研修カリキュラム(案)では、分析で不確かさが生じる要因(スペクトル干渉/非スペクトル干渉)について整理している。非スペクトル干渉の有効な補正として、目的成分と内部標準物質のイオン信号強度比と濃度比の関係をもとに目的成分の濃度を求める方法等を整理している。本研修カリキュラムの後半ではウラン濃度の計算例について記載した。

(3) 試料採取や前処理に必要な知識や技能(化学分離を含む)

ICP-MS における研修カリキュラム(案)では、試薬調製として硝酸の濃度調整、ウラン標準溶液の調製、ビスマス溶液の調製及び検量線用標準液の調製方法を整理している。また、ブフナー漏斗、耐圧瓶を用いた海水試料のろ過から濃度調整した硝酸を加えることによる試料の調製方法について記載した。

(4) 分析装置と操作方法(校正を含む)に関する知識や技能

ICP-MS における研修カリキュラム(案)では、ICP-MS の基本的な装置構成(試料導入部や質量分離部)の機能や役割から、試薬・標準液調製に係る試薬・器具の機能や役割を整理した。また、測定に際する分析装置の始動・最適化についても整理した。

¹⁶⁾ 文部科学省「放射能測定シリーズ14 ウラン分析法」(平成14年改訂)

<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No14.pdf>

表 3-12 研修カリキュラム(案)(ICP-MS)

項目	内容
第1章 「ICP-MS の技術概要」	1.1 本研修で取り扱う装置 1.2 ICP-MS の基本的な装置構成 1.3 装置構成 1.4 干渉
第2章 「分析の概要」	2.1 本研修での分析対象 2.2 分析の流れ 2.3 本研修での測定方法(内部標準法)
第3章 「ウラン測定に必要な資機材等」	3.1 必要資機材一覧 3.2 装置 3.3 使用器具
第4章 「試薬調製」	4.1 硝酸の濃度調整 4.2 ウラン標準溶液の調製 4.3 ビスマス溶液の調製 4.4 検量線用標準液の調製
第5章 「前処理」	5.1 試料のろ過 5.2 試料の調製
第6章 「ウラン濃度・放射能の計算」	6.1 測定試料中のウラン濃度の算出 6.2 試料のウラン濃度・放射能の算出
(参考資料)	

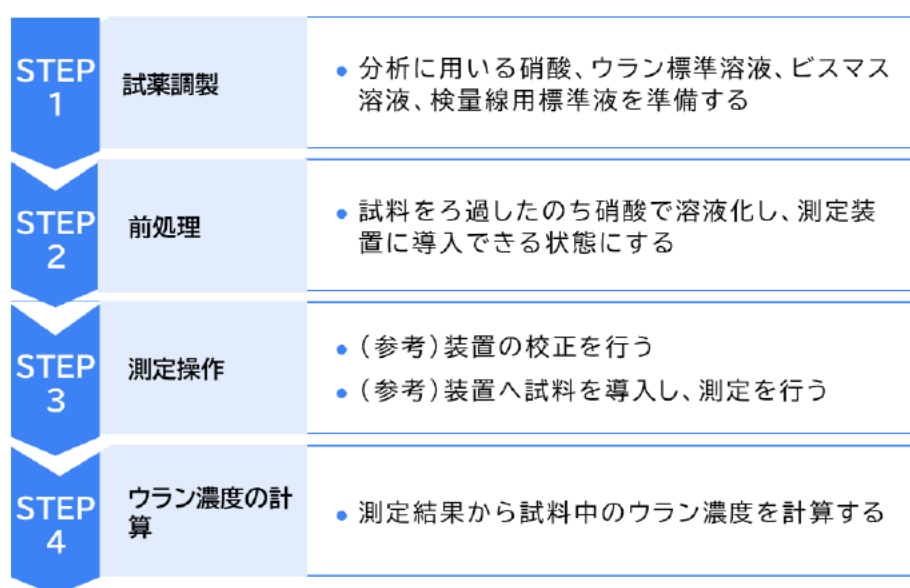


図 3-3 分析フロー(ICP-MS)

3.3.2 液体シンチレーションカウンタ

(1) 研修カリキュラム(案)と分析手順

液体シンチレーションカウンタにおける研修カリキュラム(案)と分析手順(フロー)を表 3-13 及び図 3-4 に示す。本研修カリキュラムでは、液体シンチレーションカウンタでトリチウム濃度を測定することとしてカリキュラムを策定した、また、前処理として固体高分子電解質(SPE)による電解濃縮について記載した。分析フローについてはトリチウム分析法^{17,18}を参照して作成した。

(2) 分析に必要な知識や技能(化学分析の作業を含む)

液体シンチレーションカウンタにおける研修カリキュラムでは、トリチウムが放出する低エネルギーの β 線の説明から、液体シンチレータの歴史についてニュートリノ等比較的身近な例を引用して整理した。トリチウム濃度測定については、得られた結果からトリチウム濃度を算出する計算例を記載した。

(3) 試料採取や前処理に必要な知識や技能(化学分離を含む)

測定対象となる環境水のトリチウム濃度レベルは非常に低いこともあり、低バックグラウンド用液体シンチレーション計数装置の検出下限値(1Bq/L)とほぼ同程度、もしくはそれ以下であるため、このような試料を精度よく分析するためには、トリチウムを濃縮する必要がある。トリチウムの濃縮には水を電気分解する方法(電解濃縮法)が広く用いられているが、電解濃縮法の中でも、主に、金属電極を用いてアルカリ水溶液を電解する電解濃縮と固体高分子電解質(SPE)を用いた電解濃縮がある。現在1F 廃止措置におけるトリチウム分析では、SPE を用いた電解濃縮が検討されており¹⁹、本事業の研修においても SPE による電解濃縮を想定した前処理手順でカリキュラムを策定した。

(4) 分析装置と操作方法(校正を含む)に関する知識や技能

液体シンチレーションカウンタにおける研修カリキュラムでは、概略構造から、シンチレータ(蛍光物質)の解説を整理した。また、バックグラウンド測定の必要性や液体シンチレーションカウンタを用いてトリチウムを測定する際に液体シンチレータの夾雑物である水分子の存在によって減光(クエンチング)する現象から、それらを補正する(クエンチング補正曲線を作成する)必要性を整理し、クエンチング補正曲線作成について手順を整理した。

¹⁷ 文部科学省 放射能測定法シリーズ「トリチウム分析法」 <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No9.pdf>

¹⁸ 環境放射線モニタリング技術検討チーム第17回会合「トリチウム分析法改訂案」
<https://www.nra.go.jp/data/000414726.pdf>

¹⁹ 東京電力 HD 株式会社「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する福島第一原子力発電所海域モニタリング計画について」
https://www.tepco.co.jp/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2022/1h/rf_20220324_7.pdf

表 3-13 研修カリキュラム(案)(液体シンチレーションカウンタ)

項目	内容
第1章 「トリチウム測定の意義と技術概要」	1.1 分析の範囲 1.2 分析に係る基礎知識・留意事項 1.3 分析の概略チャート
第2章 「トリチウム測定に必要な資機材等」	2.必要資機材等
第3章 「分析試料の採取」	3.1 分析試料の採取概要 3.2 海水の採取
第4章 「前処理」	4.1 固体高分子電解質(SPE)による電解濃縮の概要 4.2 試料の電解前蒸留 4.3 SPE 電解濃縮
第5章 「試料調製」	5.1 乳化シンチレータ 5.2 振とう・静置
第6章 「放射能測定」	6.1 放射能測定概要 6.2 測定条件の設定 6.3 測定 6.4 海水試料中の放射能濃度の算出
第7章 「トリチウム濃度の計算例」	
(参考資料)	

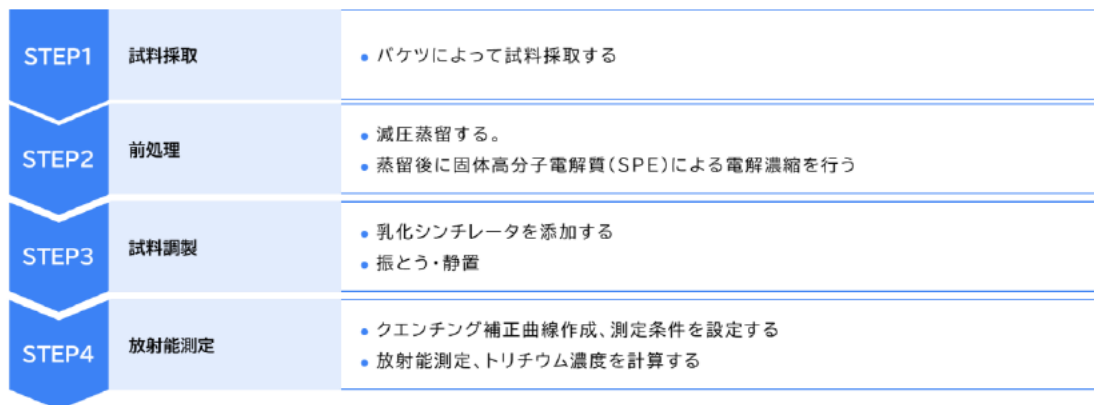


図 3-4 分析フロー(液体シンチレーションカウンタ)

3.3.3 Ge 半導体検出器

(1) 研修カリキュラム(案)と分析手順

Ge 半導体検出器における研修カリキュラム(案)と分析手順(フロー)を表 3-14 及び図 3-5 に示す。本研修カリキュラムでは、Cs-137 についての定量分析方法として、土壌、伐採木を想定した Ge 半導体検出器による分析手順を整理した。

(2) 分析に必要な知識や技能(化学分析の作業を含む)

Ge 半導体検出器における研修カリキュラム(案)において、 γ 線の基礎知識から γ 線核種の基礎知識、Cs-137 の壊変について整理している。また、測定試料の放射能を測定する際には放出される全放射線量と検出器に入射する放射線量の割合を把握することが重要として、標準化されている容器としてマリネリ容器や円筒型容器を整理している。また、測定時に得られた結果から、通常はソフトウェアで自動的に行われるピークサーチについて、理解促進のための演習を記載した。試験データを対象とした、ピークの探索、ピーク中心の決定(三点計数値法、1次微係数ゼロクロス法)、ピーク面積の算出(コペル法、関数適合)等について整理している。

(3) 試料採取や前処理に必要な知識や技能(化学分離を含む)

Ge 半導体検出器を用いた γ 線測定では、測定対象核種の分離精製を必要としないが、測定試料の体積が大きくなることから、容器内で均一にすることや一定の形状を保つこと等、測定に向けた留意事項を整理している。その上で、伐採木の乾燥試料や灰試料及び土壌の前処理手法について整理している。

(4) 分析装置と操作方法(校正を含む)に関する知識や技能

測定に係るゲイン調整や、エネルギー校正、半値幅校正及び測定効率校正等の校正についてポイントとともに手順を整理した。また、 γ 線は試料測定時に周辺環境や測定器自体からの放射線も同時に計測されるため、試料の測定前もしくは測定後に検出器のバックグラウンド測定を行う必要性について記載している。Ge 半導体検出器は使用時には液体窒素温度に冷却された状態にする必要があることについて、冷却していない状況で電圧を印加すると漏れ電流が流れて故障の原因となること等、装置を取り扱う上での留意事項についても記載している。

表 3-14 研修カリキュラム(案)(Ge 半導体検出器)

項目	内容
第1章 「本教材の位置づけ等」	1.1 分析の範囲 1.2 分析に係る基礎知識・留意事項
第2章 「放射能測定の原理」	2.1 測定原理 2.2 Ge 検出器の特徴 2.3 測定手順
第3章 「Cs-137 測定に必要な資 機材等」	3.1 必要資機材等
第4章 「放射能測定」	4.1 試料の前処理 4.2 測定機器の準備 4.3 測定機器(検出器)の校正 4.4 放射能測定
第5章 「解析」	4.1 解析 4.2 解析手法の原理
【演習】ピーク部の面積算出	

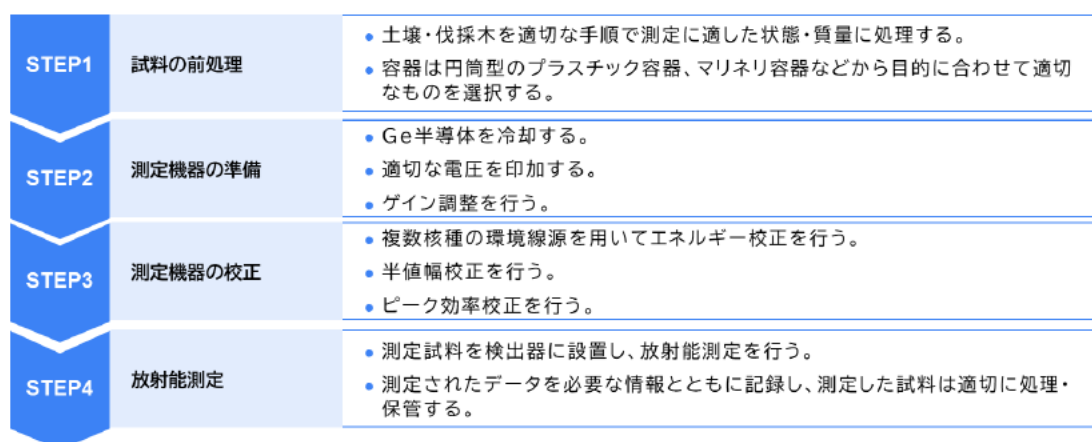


図 3-5 分析フロー(Ge 半導体検出器)

4. 必要な施設・設備の調査

次年度以降の研修会実施に向けた FS 調査として、研修会の開催規模、それに必要な施設・設備の調査・検討を行った。なお、本事業は『福島国際研究教育機構』の一部事業であることを踏まえ、研修会の開催地は福島県の浜通り地域で実施することを想定している。以下、調査・検討結果を示す。

4.1 施設・設備に係る調査

(1) 調査対象

以下の施設・設備を調査した。

- ① 福島廃炉技術者研修センター(福島原子力企業協議会)
- ② 福島復興支社((株)アトックス)
- ③ 福島テクニカルセンター(東京パワーテクノロジー(株))
- ④ 櫛葉遠隔技術開発センター(JAEA)
- ⑤ 大熊分析・研究センター(JAEA)
- ⑥ 福島県ハイテクプラザ 南相馬技術支援センター
- ⑦ 福島工業高等専門学校
- ⑧ 東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

(2) 調査結果

調査結果を以下に記す。

1) 福島廃炉技術者研修センター(福島原子力企業協議会)

位置・場所	実施内容概要
福島県双葉郡大熊町大字夫沢字北原 22 東京電力 HD(株) 福島第一原子力発電所 協力企業棟内	● 放射線防護教育 ● 作業班長研修 ● 防火特別教育 ● 職長・安全衛生責任者講習 ● フルハーネス型安全帯使用特別教育 ● 酸素欠乏症等機器作業 ● 低圧電路作業
調査結果	
● 放射線防護教育などの教育を行うための会議室が1部屋あるのみである。 ● 核種分析を行うための機器・設備などは設置されていない。 ● 新たに機器・設備を設置するためのスペースはないものと考えられる。 ● 座学研修であれば、現在も実施していることから、実施することは可能であると考えられる。	

2) 福島復興支社((株)アトックス)

位置・場所	実施内容概要
福島県双葉郡富岡町大字本岡字赤木 100 番地 2 号	● 基礎教育 ● 遠隔操作技能訓練 ● 資格取得支援 ● 技能向上教育 ● 特別教育
調査結果	
● ロボット操縦訓練、マニピュレータ操縦訓練、設備運転・保守訓練員、危険体感訓練教育などを行っている施設である。核種分析を行うための機器・設備などは設置されていない。 ● 危険体感訓練は1F で作業をするためには必須である。アトックス技能訓練センターは東京電力の公式認定機関となっている。 ● 分析のために新たに機器・設備を設置することは想定されていない。	

3) 福島テクニカルセンター(東京パワーテクノロジー(株))

位置・場所	実施内容概要
福島県双葉郡富岡町大字上手岡字茂手木 55-1	● 放射線管理・運営 ● 放射能分析・測定 ● 廃棄物回収・処理
調査結果	
● 新しく機器を導入するスペースはない。その際には、電源増設も必要となる。 ● 装置は社内研修で半年程度は埋まっており、講義室は95%程度使用している状況にある。 ● 毒劇物の取扱いは可能であるが、非管理区域の施設である。	

4) 楡葉遠隔技術開発センター(JAEA)

位置・場所	実施内容概要
福島県双葉郡楡葉町大字山田岡字仲丸 1-22	● バーチャルリアリティシステム ● ロボットシミュレータ ● 実規模モックアップ試験
調査結果	
● 研究管理棟には、座学研修などを実施できる会議室が多数あり、利用料を支払うことで利用可能である。 ● 研究棟には、ロボット試験用水槽やモーションキャプチャーなどの試験が実施できるエリアと6つの研究室がある。 ● 核種分析を行うための機器・設備などは、設置されていない。 ● 新たに機器・設備を設置するためのスペースはあるが、核種分析のための前処理などの化学処理を行うことは現状では難しいと考えられる。 ● 研究室(約 60m³/部屋)に設置して利用する場合には、通常料金として約 1 万円/日費用が必要となっている。	

5) 大熊分析・研究センター(JAEA)

位置・場所	実施内容概要
東京電力福島第一原子力発電所敷地内 (大熊町)	● 1F 事故で発生した放射性廃棄物や燃料デブリの性状等の把握のための分析・研究 ● モックアップ施設での分析作業の教育訓練
調査結果	
● 第一棟と第二棟を整備予定であり、第一棟は既に運用を開始し、ホット環境にも対応可能である。 ● 第一棟は、ガレキ類、汚染水処理に伴う二次廃棄物等の低・中線量($\leq 1\text{Sv/h}$)のガレキ類、汚染水処理に伴う二次廃棄物等の分析、および、東京電力 HD から独立した立場で ALPS 処理水の第三者分析を実施する施設である。 ● また、放射性固体廃棄物の高度な分析をより効率的かつ安全に行うため、自動分析装置のような様々な技術開発を実施していく予定である。 ● 第二棟は、建設準備中であり、燃料デブリ等の高線量試料の分析を行う施設である。 ● 第一棟には、ICP-MS、液体シンチレーションカウンタ、Ge 半導体検出器、フードやグローブボックスなどの分析に必要な機器・設備は備わっている。 ● 1F の敷地内にあり、当センターで研修を行うためには1F 内への入構手続きも必要となり、ネックとなると考えられる。	

6) 福島県ハイテクプラザ南相馬技術支援センター

位置・場所	実施内容概要
福島県南相馬市原町区萱浜字新赤沼 83 (福島ロボットテストフィールド研究棟内)	● 福島ロボットテストフィールド
調査結果	
● 南相馬ハイテクプラザはドローン、ロボット用の試験施設という色が強く、将来的にそのような方向に充実していくものと考えられる。 ● 電波暗室はドローン試験のため、4G、5G、Wi-fi 環境を再現できるのが他にはない特徴。 ● 化学分析系の装置はほとんどなく、郡山の方が充実している。	

7) 福島工業高等専門学校

位置・場所	実施内容概要
福島県いわき市平上荒川長尾30	● 機械システム工学科棟 ● 電気電子システム工学科棟 ● 化学・バイオ工学科棟
調査結果	
● 主な分析装置(2011年ごろに導入)は以下の通り。ドラフト3基/室(全てスクラバ付)も保有。 ➢ 液体シンチレーション(低バックグラウンド用)HITACHI LSC-LB7 1基 - 液体シンチレーション HITACHI LSC-8000 1基 ➢ ICP-MS Perkin Elmer NexIon300D 1基 ➢ Ge 半導体検出器(液体窒素は充填式) セイコーイージーアンドジー社 1基 ● 乾燥等の Multiwave3000、電気炉(約 1500℃)6 台、化学分析のための機器も一通り保有。装置の維持管理も対応可能である。 ● 実習室3室(定員 20 名)で、講義室2つ(定員 20 名)が使用可能である。スケジュール次第で講義室は他用途にも使用可能。ただし、管理区域はない。 ● 夏期休暇と年度末が授業は休みとなるため、利用しやすい。土日祝日も対応は可能である。月・木は午後に学生実験。2月ごろに年間の授業スケジュールが確定する。 ● 放射化学分析の講師2名、技術職員2名がいる。研修の講師も引き受け可能である。 ● 装置は古いこともあり、新しい装置導入のスペースもあり、排気ダクトなどの工事も可能である。 ● 地域貢献の一環もあり、当高専を使っていただきたい思いがある。	

8) 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

位置・場所	実施内容概要
宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3	● 加速器研究部 ● 測定器研究部 ● 核薬学研究部 ● サイクロトロン核医学研究部 ● 放射線管理研究部
調査結果	
● コロナ前は年間数百人の学生の利用があり、P-32 の非密封線源などの講習を年二回、毎年行っていた。コロナ後実習は行っておらず施設の利用については歓迎されている。 ● 当時はドラフト 16 台、2 人ずつで最大 32 人の実習を行っていた。 ● サイクロトロンについては、外部の利用実績はあるが、RI施設単独ではそれほどない。 ● 施設について、外部利用の方は、共同研究として原則無料で使用してもらっている。 ● Sr-90についても RI 許可は取得しており使用可能である。 ● 講師や補助スタッフ(学生の TA 等)の手配も可能である。	

(3) 必要な施設・設備についての検討結果

分析人材を育成する上では、1F 廃棄物の性状、放射能インベントリ等を適切に理解する必要がある。1F 廃棄物は 1F 事故時のフォールアウトの影響を受けた廃棄物であり、一般的な原子力発電所等において発生する放射性廃棄物と異なり、多様な放射性核種による汚染と、汚染された廃棄物(対象物)毎固有の性状(伐採木等の有機物、土壌等の無機物、がれき等の金属、コンクリート等)がある。こうした分析対象物の特性を踏まえれば、分析の方法(主に化学的な前処理)や分析装置等を柔軟に選定・利用できる研修環境の選定が望ましい。また、効率的・効果的に研修・人材育成を行っていく観点では、いわゆる環境試料を利用することで、RI 規制を受けず、迅速に研修を実施することが可能であり、環境試料を主とした研修および研修環境の整備を優先し、将来的に非密封 RI 等を利用したより発展的な研修へとつなげていく形をとることで効率的かつ効果的な研修実施が可能であると考えられる。こうした背景および(2)の結果に基づき、研修会の実施施設として適切と考えられる施設を以下の通り特定した。

- 福島工業高等専門学校(主に環境試料等を利用したコールド環境での研修実施施設)

- 選定理由

福島県浜通り地域に存在すること。座学研修等を実施する講義室等を有していること。管理区域は設定されていないものの、一定の設備・機器が整備されており、環境試料であれば迅速に研修(実習を含む)の開催が期待できること。また、新たな設備・機器の導入(分析装置の設置等)に関してもスペース、環境としての余裕があること。

- 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(主にホット環境での研修実施施設)

- 選定理由

福島県浜通り地域には存在しないものの、十分な設備・機器や体制を有しており、研修施設としての環境も整備された施設であり、ホット環境での研修の開催が期待できること。また、 α 核種等の許可も取得しており、将来的な α 核種汚染物の分析研修等にも発展が期待できること。

4.2 研修会の開催規模等に係る検討結果

福島工業高等専門学校および東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの両施設とも、座学研修（講義等）を実施できる環境を有しているとともに、実習型研修に必要な各種設備・機器が備わっており、10～20名/回程度の実習型研修が実施可能であることを確認した。

これに基づき、研修会の内容およびその開催規模を以下表 4-1 の通り想定する。

表 4-1 研修会の内容と開催規模の想定について

研修会内容	開催規模等																									
座学研修	両施設保有の講義室を利用、オンラインでのハイブリッド実施も想定																									
実習型研修(コールド)	環境試料を利用し、前処理から放射能測定までを実習形式で実施。化学実験設備を利用した実習形式とし、10～20 名/回程度の実習を連続 5 日間程度で実施。(福島工業高等専門学校にて実施) 【開催に係る想定】 スクールカレンダーおよび前期時間割を考慮した結果、水曜日以外の午後は化学バイオ工学科の共通実験室を使った授業が存在するため、基本的には以下のカリキュラムであれば授業に関係なく実施可能である。 <table><tr><td>月曜日</td><td>午前</td><td>ガイダンス・講義</td><td>午後</td><td>講義</td></tr><tr><td>火曜日</td><td>午前</td><td>講義・前処理</td><td>午後</td><td>測定実習</td></tr><tr><td>水曜日</td><td>午前</td><td>講義・前処理</td><td>午後</td><td>測定実習</td></tr><tr><td>木曜日</td><td>午前</td><td>講義・前処理</td><td>午後</td><td>測定実習</td></tr><tr><td>金曜日</td><td>午前</td><td>講義</td><td>午後</td><td>まとめ</td></tr></table> また、状況に応じて土日・祝祭日等での実施も学内調整後に実施可能である。座学の講義については、授業日であっても空き教室を使用することで、時間や曜日の制限を受けずに実施可能である。	月曜日	午前	ガイダンス・講義	午後	講義	火曜日	午前	講義・前処理	午後	測定実習	水曜日	午前	講義・前処理	午後	測定実習	木曜日	午前	講義・前処理	午後	測定実習	金曜日	午前	講義	午後	まとめ
月曜日	午前	ガイダンス・講義	午後	講義																						
火曜日	午前	講義・前処理	午後	測定実習																						
水曜日	午前	講義・前処理	午後	測定実習																						
木曜日	午前	講義・前処理	午後	測定実習																						
金曜日	午前	講義	午後	まとめ																						
実習型研修(ホット)	環境試料並びに非密封放射線源(Sr-90 等)を利用し、前処理から放射能測定までを実習形式で実施。化学実験設備を利用した実習形式とし、10～20 名/回程度の実習を連続 5 日間程度で実施。(東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターにて実施) 【開催に係る想定】 同施設は、サイクロトロン施設が併設されており、照射試料等の分析等にてラジオアイソトープセンターの同時利用が想定される。現状においては、ラジオアイソトープセンターの利用想定はないことから、サイクロトロンの外部利用予定に応じてラジオアイソトープセンターの利用可否並びに研修の実施可能性を検討していくこととなる。																									

5. 外部有識者などを対象としたヒアリングの実施

放射性廃棄物・RI・研究所等廃棄物、1F 廃棄物の性状把握や分析に関する専門的な知見を有する外部有識者へのヒアリングを行うとともに、実際の分析作業の研修の受講に向けた予見性を確保すべく福島県内で分析施設・設備等を保有する企業・施設の事業者等へのヒアリングを実施した。

(1) 外部有識者ヒアリング

外部有識者として、専門性を鑑みて以下の専門家にヒアリングを実施した。

所属・氏名	専門性
東北大学 桐島 陽 教授	資源プロセス、溶液化学、放射化学、核燃料サイクル、放射性廃棄物
福島大学 高貝 慶隆 教授	分析化学、分離化学
元福井大学 柳原 敏 教授	廃止措置工学
東北大学 渡部 浩司 教授	放射線科学、核医学物理学

1) ヒアリング結果

ヒアリングで得られた意見を「分析人材の確保」「研修で実施すべきポイント」「研修で取り扱うべき内容」「化学分析人材の今後の展望」といった観点で整理を実施した。

a. 分析人材の確保について

- 分析人材の確保にあたって、エンドステートを見据えた必要人員、計画を考える必要がある。そこで重要となるのが、管理・処分という観点から廃棄物のどのような特性を押さえるべきか把握することであろう。
- 福島第一原子力発電所由来の廃棄物の分析に係る人材育成は、通常炉における分析人材の育成とは全く違う観点で進める必要があると考えられる。原子力業界のみで育成するのではなく、分析化学等の異分野の専門家を招いて理論から教育していくことが必要ではないか。
- 分析実施者だけでなく、解析結果を導出するオペレータ、全体の分析の方向性をリードするマネージャーといった上位層の人材育成も同時進めていく必要があるだろう。

b. 研修で実施すべきポイント

- ICP-MS を用いた研究を行っている学生に対しての教育は、組み立て、トラブル対応等まで含めたところまで教育を行っている。2 か月程度でこれらの対応が可能となるが、マニュアルなどではなく OJT で教育する形式を取っている。講習を実施する場合は、原理を理解したうえで手順を学ぶ事が重要だが、原理ばかり説明してしまうと受講者の興味が薄れてしまう懸念がある。ま

た、少人数で装置を見せながら講習することも有効であるとする。

- 企業への講習として、座学・実習を実施しているが、トラブルシューティングへのニーズもあると感じる。トラブルへの個別対応に近くなるため、メーカーが直接指導するようなこともある。このような形で指導しながら進めていく必要があるため、少人数の実習が良いと思われる。
- 研修を受講したことに対するインセンティブについては、参加者も業務上必要であるために参加しているという理由が多いため、特に必要は無いのではないと思われる。学生が受講するメリットについては、講習で企業とつながりを持つことで、その後の就職に繋がることにあるのではないかと。
- データありきではなく、測定の目的を明確にすることが重要であり、目的が明確となることで結果のばらつきなどをどの程度許容できるかなどが変わってくる。そのため研修では何のために分析をするのかという前提を理解したうえで技術を習得すべきである。
- 分析を行ううえで重要となるのはキャラクタライゼーションであろうと考える。実習では試料の準備が予めされたうえで前処理から分析まで取り組むような構成になると思われるが、どのサンプルからどのような結果が出たのか、さらにはその結果として廃棄物はどのように扱うべきか考察させるべきだと思われる。

c. 研修で取り扱うべき内容について

ア) ICP-MS

- 化学分析において、ICP-MS と放射能測定のどちらの手法を採用すべきか判断する際には核種の半減期によって分類すると良いと考えられる。
- ICP-MS の検出限界値は非常に条件の良い場合で 1×10^{12} [g] 程度であり、この値を基準としたときに ICP-MS 分析を選択すべきだと考えられる核種は U-238 などの長半減期の核種であるとされる。これは半減期が長い核種は 1Bq 当たりの質量が大きくなるため、放射能分析では測定できないような低い放射能強度の試料であっても ICP-MS では測定可能となるためである。
- また、例えばアクチノイド元素のように質量数が高いものは妨害となるような核種が少なくなることなどから、より低濃度まで測定が可能となる。
- Sr-90 は 1Bq 当たりの質量が ICP-MS の検出限界値よりもわずかに低い値になっており、放射能測定による分析が適していると考えられる。

イ) 分析化学の基礎的な所作

- 廃棄物の化学分析において最も留意すべき事項はコンタミ対策である。特に前処理の工程ではマイクロピペットを用いて試料の調製を行うが、誤って溶液にマイクロピペットが触れてしまい、濃度が誤って調整されてしまうことが初学者のありがちなミスである。また、Mg, Fe などを測定元素とした場合、空気中の塵などにも多く含まれている元素であるため、使用する器具の洗浄が十分でない場合に検量線が直線にならないといった事象も発生しうる。
- また、ICP-MS 分析では標準液の調製を多く実施するが、取り違えが発生しないように記録を取りながら都度チェックすることが重要である。

d. 化学分析人材の今後の展望について

- 今後、多くの分析が質量分析に移行すると予想される。従来、東日本大震災以前は半減期が 1 万年未満の核種については質量分析が困難だと言われていたが、Sr-90 のような比較的短半減期の核種であっても ICP-MS で分析できるという成果が発表され、様々な核種を ICP-MS で分析する流れとなった。また、原子力分野以外では航空分野や宇宙分野、レアメタル等幅広く使える可能性を有している。
- 10 年後には、Cl-30、I-129、Tc-99、Zr-93 など、これまで ICP-MS での質量分析がされていなかった元素に対しても適用されるようになると考えられる。その際に、日本がその流れに対応できるような体制を準備することが必要になるのではないかと考えられる。
- また、福島第一原子力発電所からの燃料デブリ取り出しの際はほとんどが ICP-MS で計測されるようになると考えられる。
- 非密封の RI を使える人材が減ってきており、大学内でも分析化学・放射化学の人材は減少傾向にある。薬学に関しては RI 施設が無くなり、国家試験でも座学のみとなっている。その一方で RI 治療は世界的にも盛り上がりを見せており、放射線分野としても人材育成は急務である

(2) 企業・施設等ヒアリング

実際の分析作業の研修の受講に向けた予見性を確保すべく、福島県内で分析施設・設備等を保有する企業・施設の事業者等へヒアリングを実施した。

企業・施設名	事業内容
企業 A	発電所設備機器の運転・保守・管理、建設・土木、環境調査測定、分析業務等を行っている。
企業 B	発電所の水質測定・管理や廃止措置関連業務等、化学分析業務を含む発電所関連事業を行っている。
企業 C	発電所関連の放射能分析やアスベスト分析、実験装置・設備のエンジニアリング等を行っている。
企業 D	放射性物質分析、放射線管理、放射線測定、開発試験、施設運転、廃棄物処理等の事業を行っている。

1) ヒアリング結果

ヒアリングで得られた情報・意見を「現在行っている分析業務」「1F 廃棄物分析の環境」「分析を行う社員の育成」「研修へのニーズ」といった観点で整理を実施した。

a. 現在行っている分析業務

- 発電所関連事業として主に行っている分析業務の対象は水質(濃縮廃液)と金属(表面汚染)である。分析対象核種、装置類については、 γ 線源核種は Co-60, Cs-137 がメインであり、ゲルマニウム半導体検出器を使用している。 β 線源核種はガスクロマトグラフィーと液体シンチレーション検出器を活用し、Tc-99、Sr-90 等を分析している。
- 発電所由来の核種分析として主に SUS、コンクリート等鋼材中の核種分析を行っていた。震災以降はセシウム、ヨウ素、Sr-90 等環境中の核種の分析が加わり、近年では ALPS 処理水の放出の影響もありトリチウムの分析を行っている。さらにヒラメ、アナゴ、カレイ、二枚貝等の魚類の分析も行っている。
- 分析装置としては ICP-MS、液体シンチレーション、Ge 半導体検出器のほか、低バックグラウンドガスフローカウンター、シリコン半導体検出器、ZnS 検出器等を顧客の要望に対応できるよう揃えている。
- 分析手法については妥当性確保のため、公定法での分析を多く行っている。

b. 1F廃棄物分析の環境

- α 核種の取り扱いの経験が今までないため、マスクの装着や装置の着脱などの α 汚染核種汚染防止訓練は重要である。
- 1F 内の分析装置は東京電力の所有であり、入構手続きに2～3か月程度の時間を要する。
- 現在1Fで行われている海水、滞留水等の液体試料の分析は前処理がほぼ不要であり、分析について高い技量は求められない一方で、今後分析予定の固体試料、 α 核種については分離・溶解等の操作が必要となり高い技量が求められる。

c. 分析を行う社員の育成

- 自社所有の研修施設でのトレーニング、現場での OJT、外部研修の受講といった育成方法がある。
- 化学分析について学習する際の望ましい事前教育については、「機器の校正・操作方法」「機材の汚染管理」「コンタミ対応」がある。特にイレギュラーな事態に対する対応方法を習得する事、使用機材の違いやホット・低レベル・コールド等の区画分けの有無など、分析環境の違いを事前に定めておくことが重要である。
- 金属の分析については、金属の種類によって溶ける、溶けないといった差がでるため、素材によって前処理方法が異なるので、主に化学分析に供するまでの前処理を中心として習得している。
- 社員のスキルチェックに関しては、IAEA のような信頼を置ける機関の配布試料について他の機関と同じく分析を行う技能試験に参加することで技術が身に付いているか判断する。
- ホット・コールドでの育成について、ホット研修では分析手法以外でも気を付ける事項があるため、分析の理解自体が目的であれば、コールド研修の方が容易である。
- 独自基準として分析人員を初級・中級・上級とレベル分けしている。それぞれの分析機器の原理が分かれば初級、それらを使って測定ができれば中級、その分析結果を評価・指導までできれば上級、と定義している。
- 人材の高齢化、若い人員(初・中級レベルの分析人員)の不足が課題となっている。

d. 研修へのニーズ

- 前処理については経験者が少なく、今後1F 現場において分析が行われるデブリのような、組成が不確かな物質や、セシウム・ストロンチウムが多く含まれている物質の前処理工程は複雑なものになる事が予想されるため、前処理に関する研修のニーズがある。
- 核種による適切な前処理手法の選択や、現場で違和感に気づく感覚の醸成が必要である。
- 上長・管理者向けのカリキュラムや研修もあると良い。管理者は数年で交代となってしまう、一から学習しなければいけないためである。
- 化学分析の実務者としては、クロスチェックの重要性を感じている。分析結果の正確性についてクロスチェックを通じて確認したい。
- 社員教育として他機関の講習を受講させる際、参加可能人数が限られているのが課題である。
- 他機関の講習では受講者に講習修了の認定証を発行しているが、それが分析人員のスキルを判断する一つの指標となっており、研修においてそのような資格・認定面を整備しておくことが望ましい。
- 研修における最大のインセンティブは会社からの立地の近さである。社員に研修を受講させるにあたり、何日間現場を離れさせる必要があるかが受講させるか否かの判断材料となるためである。
- 研修の資格認定については、分析現場それぞれで分析対象や環境が異なるため、一律の資格を付与しても第一線で活躍可能であるという判断材料にはならず、大きなインセンティブにはならない。
- 中・上級者の再教育よりも初・中級者をターゲットとした研修にニーズがある。中級者であっても出来る分析と出来ない分析があり、後者を補うような研修にニーズがある。
- ホット実習のニーズがある。グローブボックスやフード、鉄・コンクリートセルを用いた作業も研修で体験させるのが望ましい。

6. まとめ

6.1 成果の概要

本事業では、1F 廃炉を滞りなく進め、ひいては今後の国内における廃止措置事業にも資するため、短期間で画一的に高いレベルを持った放射性物質の分析人材を大量に育成することを目的とし、国内の研究所、企業、大学等向けの『実践的な研修プログラム』を整備するとともに、次年度以降の研修会実施の実現可能性について調査した。具体的な成果概要は、以下の通りである。

(1) 研修対象とする分析手法の調査・特定

対象とする 1F 廃棄物の性状や想定される発生量、汚染度、汚染核種などを踏まえ、重要となる分析手法を優先的に選定し、研修カリキュラムで取り扱うべき分析手法について特定した。

(2) 効率的・効果的な研修方法の検討

分析作業を現場実務として実践できる、分析作業者の育成を最優先とし、分析手法の原理等の知識(knowledge)、分析手法の取扱い等の技能(skill)、1F の廃炉における分析の重要性理解等の姿勢(attitude)の観点で研修カリキュラムを整備した。

(3) 必要な施設・設備の調査

(1)で特定した分析手法に基づき(2)で整備した研修カリキュラムに対して、R5 年度以降の実際の研修実施・開催に向け、福島県浜通り地域を優先しつつ、研修実施に必要な施設・設備を調査した。具体的には、ワールド環境の施設としては、福島工業高等専門学校とし、ホット環境の施設としては、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターに特定した。

(4) 外部有識者などを対象としたヒアリングの実施

放射性廃棄物・RI・研究所等廃棄物、1F 廃棄物の性状把握や分析に関する専門的な知見を有する外部有識者へのヒアリングを行うとともに、研修の実施・受講者ニーズの把握に向け、分析施設・設備等を保有する企業・施設の事業者等へのヒアリングも実施した。

(5) その他の関連する成果

R5 年度以降の研修実施に向け、研修実施施設との運用等に係る調整、体制構築、施設への設備導入の検討・調整等を追加で実施した。また、研修受講者の確保、および研修受講者の出口整備(就職等)に寄与する研修の広報、インセンティブ設計等を他事業や外部機関(日本原子力学会)と連携の上、検討した。

6.2 R5年度以降に実施すべきこと

本年度事業では、研修カリキュラムの作成や研修実施に向けた体制構築を実施した。R5 年度以降には、実際にこれら成果を基に研修を福島県内および東北大学(ホット環境での研修)で開始し、分析人材の育成を進めていくことが必要である。

R5 年度の概略のスケジュール(案)および、R5 年度以降の展開(案)を示す。

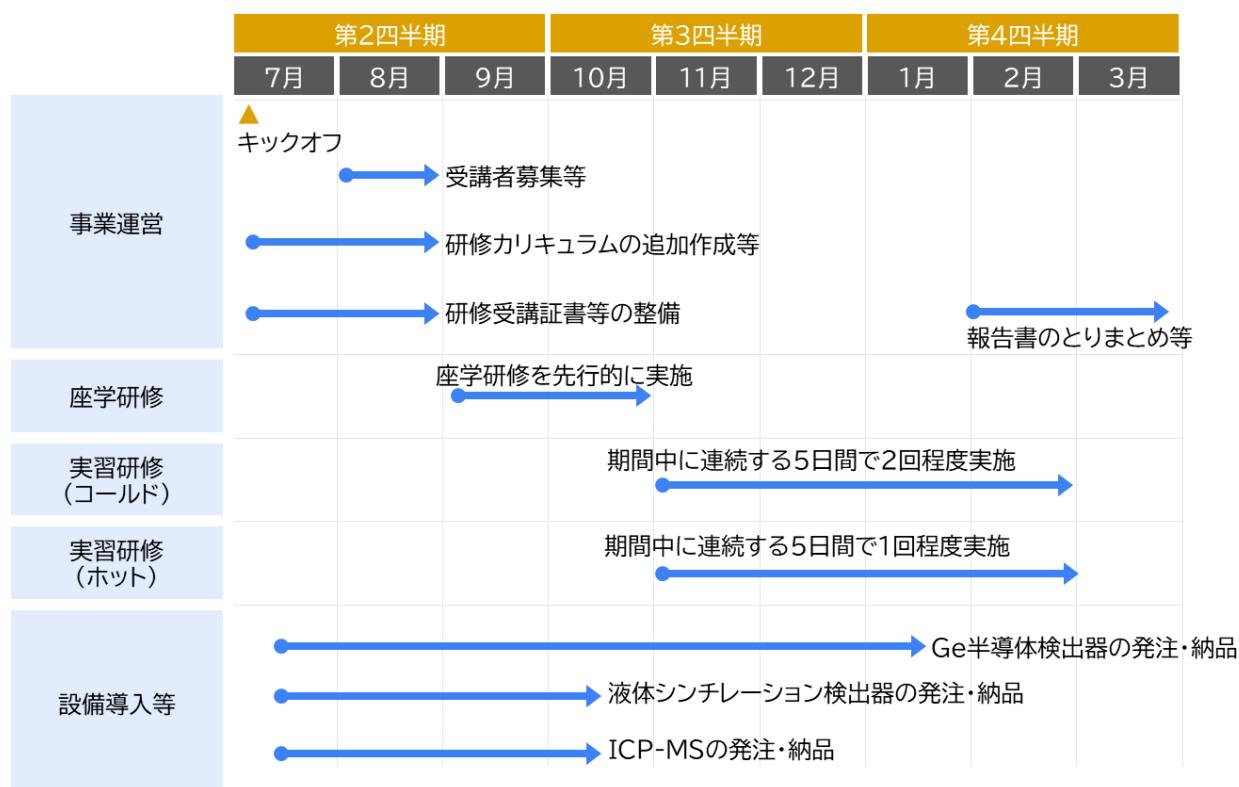


図 6-1 R5 年度事業の概略スケジュール(案)

R5 年度においては、R5 年度第 2 四半期の事業開始を想定した場合、まずは、研修実施に向け、本年度未整備の研修カリキュラム等の整備を進め、並行して研修受講者に対して受講のインセンティブとなりうる仕組み(例:日本原子力学会と連携した、証書の発行等)の具体運用の整備を進める。その後、研修受講にあたっての受講者募集を開始し、第 2 四半期後半から第 3 四半期前半にかけ、実習等を伴わない、座学研修を先行して実施する。その後、主にコールド施設における設備導入状況等も見ながら、順次実習を伴う研修をコールド施設、ホット施設にて実施する。なお、ホット施設における実習については、コールド施設における研修カリキュラムに比べて難易度が高いことを踏まえ、コールド施設における実習研修よりも後に実施することが望ましいと考えられる。

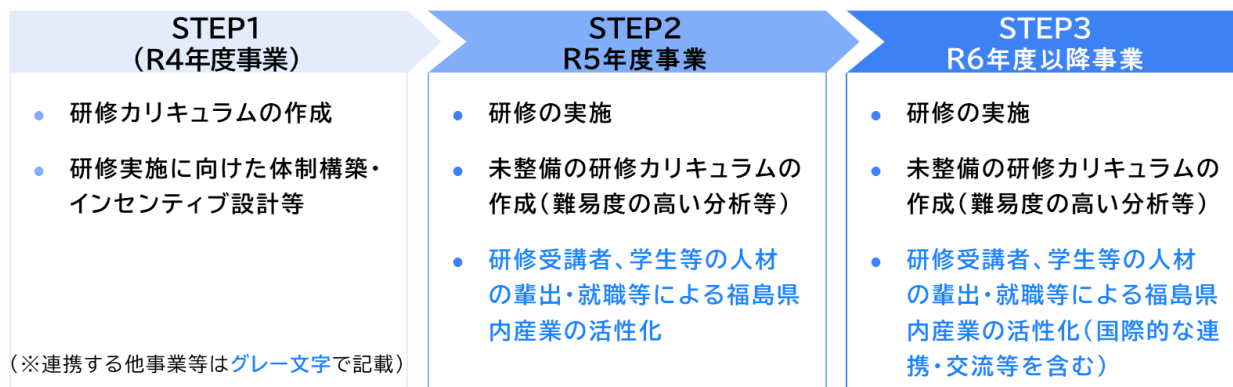


図 6-2 R5 年度以降の展開(案)

R5 年度以降においては、R5 年度事業および研修の実施状況に応じて、継続的な研修の実施、追加の研修カリキュラムの整備等を進めていく必要がある。また、事業の成果である、人材の育成・確保について、具体的な現場実務への人材の輩出・従事に貢献すべく、福島県等で行われている関連する他事業等とも連携しながら、人材の関連企業等への就職、定着に向けた取り組みも並行して進めていくことが望ましいと考えられる。

令和 4 年度新産業創出等研究開発事業(放射性物質の分析のための人材育成カリキュラムの作成等に
係る調査等事業) 報告書

2023 年 3 月

株式会社三菱総合研究所
セーフティ&インダストリー本部