

平成 29 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

船舶を活用した海上移動型
放射線モニタリングシステムの開発
(海の道からのアプローチ)

成果報告書

平成 30 年 3 月
国立大学法人 神戸大学

本報告書は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、国立大学法人神戸大学が実施した平成 27～29 年度「船舶を活用した海上移動型放射線モニタリングシステムの開発（海の道からのアプローチ）」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	v
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 各年度計画	2.2-1
3. 業務の実施内容及び成果	
3.1 船舶を活用した新システムの設計 (H27～H29)	3.1-1
3.1.1 全国の教育機関所属の船舶のネットワークの構築 (再委託先：大島商船高等専門学校 (運航情報システムに関する事柄))	3.1-1
3.1.2 船舶関係者に対する放射線教育プログラムの構築 (再委託先：量子科学技術研究開発機構、大島商船高等専門学校 (放射線 教育プログラムに関する事柄))	3.1-3
3.1.3 原子力防災体制の強化策の提案 (再委託先：福井大学 (国内・海外の防災対策の現状に関する事柄))	3.1-7
3.2 船舶への海上前線基地機能の付加 (H27～H29)	3.2-1
3.2.1 船外放射線モニターの設置と船内の放射線防護対策	3.2-1
3.2.2 高線量率や高放射能濃度環境対策としての船内線量計算と遮蔽補強	3.2-8
3.2.3 通信基地としての機能も有する船橋の設計	3.2-12
3.3 海上移動型モニタリングシステムの開発 (H27～H29)	3.3-1
3.3.1 船舶に搭載する放射線モニタリング装置のパッケージ化	3.3-1
3.3.2 ドローン搭載用放射線測定器の選定／設計／改造 (再委託先：量子科学技術研究開発機構 (ドローン搭載用放射線測定器に 関する事柄))	3.3-4
3.3.3 無人小型ボートによる緊急時及び平時の放射線モニタリング技術の開発	3.3-9
3.4 研究推進	3.4-1
4. 結言	4-1

表一覧

表 2-1	本委託業務の実施スケジュール	2. 1-4
表 3-1	船舶関係者への放射線研修時間割	3. 1-4
表 3-2	放射線関連法令	3. 2-6
表 3-3	放射線関連法令とその対象者及び実効線量限度	3. 2-7
表 3-4	3 核種に対する線量率分布の平均値からの誤差	3. 2-11
表 3-5	海上における陸上とのデータ通信の選択肢	3. 2-16
表 3-6	無人小型ボートの一覧(1)	3. 3-8
表 3-7	無人小型ボートの一覧(2)	3. 3-9
表 3-8	海洋観測用自律型水中航走体例	3. 3-14
表 3-9	深江丸実験に用いた小型ボートの緒元	3. 3-16

図一覧

図 2-1	船舶を活用した海上前線基地設置のための検討課題	2. 1-1
図 2-2	本委託業務の実施体制	2. 1-3
図 3-1	国内の原子力発電所と商船・水産系教育機関の立地場所	3. 1-1
図 3-2	大学・高専のカテゴリーで表示される各練習船主要目	3. 1-2
図 3-3	選択した練習船の現在位置と最近 1 日の航跡	3. 1-2
図 3-4	放射線レクチャー（実習）に用いる機材	3. 1-5
図 3-5	防護衣などの着衣（放射線防護実習）	3. 1-5
図 3-6	出入り口からみた船内と養生風景	3. 1-6
図 3-7	出入り口の船内側ドアの養生	3. 1-6
図 3-8	出入り口からの床部分の養生	3. 1-6
図 3-9	天井からたらしした養生シート	3. 1-7
図 3-10	階段の養生	3. 1-7
図 3-11	原子力防災体制に関するシンポジウムの様子	3. 1-10
図 3-12	船舶用モニタリングポスト検出部	3. 2-1
図 3-13	船舶用モニタリングポスト計測部	3. 2-2
図 3-14	深江丸実験における線量率の時間変化	3. 2-2
図 3-15	ランコ式除染テントの外観と内観	3. 2-3
図 3-16	神戸市消防局特殊災害隊所有のランコ式除染テント	3. 2-4
図 3-17	神戸市消防局特殊災害隊所有のフレーム式除染テント	3. 2-4
図 3-18	フレーム式除染テント HM1001C	3. 2-5
図 3-19	Xe-133 線源の高さ及び距離に対する線量率の変化	3. 2-9
図 3-20	ブリッジを精細化した計算体系	3. 2-9
図 3-21	PHITS 計算における体系（線源の大きさと高さ）	3. 2-10
図 3-22	ブリッジ内線量率の空間分布（横方向に対する変化）	3. 2-10
図 3-23	ブリッジ内線量率の空間分布（高さ方向に対する変化）	3. 2-10
図 3-24	防護服及びマスクの着用と船内の養生	3. 2-11

図 3-25	深江丸の船内及び船外の通風口	3. 2-12
図 3-26	海上での計測データ（小型船舶等）の陸上への転送手段	3. 2-13
図 3-27	RS-232C 変換基板とコネクタを取り付けた Raspberry Pi 2 B	3. 2-14
図 3-28	深江丸実験の航路	3. 2-15
図 3-29	携帯電話回線による航海中のデータ通信実験	3. 2-15
図 3-30	CeBr ₃ シンチレーション検出器（深江丸船内）	3. 3-1
図 3-31	線量計のパッケージ化	3. 3-2
図 3-32	放射線防護対策用品のパッケージ化	3. 3-2
図 3-33	船舶上の測定プロトコルの概念図	3. 3-4
図 3-34	ドローン搭載用放射線モニタリングシステム	3. 3-4
図 3-35	購入したドローン（ACSL-PF1）とその仕様	3. 3-5
図 3-36	ドローン搭載用放射線モニタリングシステムによる測定結果の一例	3. 3-6
図 3-37	深江丸実験に持ち込んだ放射線測定器一式	3. 3-7
図 3-38	線量モニタリングシステムを取り付けたドローン	3. 3-7
図 3-39	ドローンによるモニタリング実験	3. 3-7
図 3-40	B7(C-Enduro) 外観	3. 3-10
図 3-41	B8(C-worker 4) 外観	3. 3-10
図 3-42	B9(C-Worker 5) 外観	3. 3-10
図 3-43	B10(C-Worker 6) 外観	3. 3-10
図 3-44	B11(C-Worker 7) 外観	3. 3-11
図 3-45	B12(C-Worker 8) 外観	3. 3-11
図 3-46	B13(C-Worker 12P) 外観	3. 3-11
図 3-47	B14(C-Cat2) 外観	3. 3-11
図 3-48	B15(C-Target 3) 外観	3. 3-11
図 3-49	B16(C-Target 6) 外観	3. 3-11
図 3-50	B17(C-Target 9) 外観	3. 3-12
図 3-51	B18(C-Target 13) 外観	3. 3-12
図 3-52	B19(C-Sweep) 外観	3. 3-12
図 3-53	B20(C-Stat) 外観	3. 3-12
図 3-54	B21(C-Hunter) の外観（浮上時）	3. 3-12
図 3-55	B21(C-Hunter) の外観（半潜水時）	3. 3-12
図 3-56	B22(C-Cat 4) の外観	3. 3-13
図 3-57	自律型水中航走体 S1(うらしま) (JAMSTEC Web サイトより引用)	3. 3-15
図 3-58	自律型水中航走体 S4 (REMUS100)	3. 3-15
図 3-59	深江丸実験に用いた無線小型ボート外観	3. 3-16
図 3-60	小型ボートによる測定プロトコルの概念図	3. 3-16
図 3-61	小型ボート実験航行ルート	3. 3-17
図 3-62	小型ボートによる空間線量率測定	3. 3-17
図 3-63	研究推進委員会	3. 4-1

略語一覧

- AIS : Automatic Identification System (船舶自動識別装置)
- AUV : Autonomous Underwater Vehicle (自律型水中航走体)
- EGS5 : Electron Gamma Shower Version 5
(電子・光子輸送計算のモンテカルロシミュレーション)
- EMC : Emergency Radiological Monitoring Center (緊急時モニタリングセンター)
- GPS : Global Positioning System (全地球測位システム)
- IAEA : International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
- ICRP : International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)
- NBCR : Nuclear, Biological, Chemical and Radiological (核、生物、化学、放射能)
- OFC : offsite center (オフサイトセンター)
- SPEEDI : System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information
(緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム)
- UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
(原子放射線の影響に関する国連科学委員会)

概略

本委託事業においては、陸上の交通網、通信網及び送電網が破壊されオフサイトセンターや放射線モニタリングシステムの機能が喪失した場合に、機動性と自立性を有する船舶を用いてこれら機能の一部を一時的に担うという原子力災害対応バックアップシステムの構築を提案している。このシステムでは、事前に船舶ネットワークを構成しておき、原子力災害時に必要な機材と専門家が乗り込んだ船舶が異常事象発生サイトに急行し、海上前線基地として緊急時放射線モニタリングを行う。本事業では、船舶を活用した海上移動型放射線モニタリングシステムの開発を目的としており、この新システムの実現には、事前に協力して頂ける船舶の登録や船舶職員の放射線に対する忌避感低減のためのレクチャー、母船・小型ボート・飛翔体が一体となった移動体群の編成、放射線施設としての機能の追加、放射線防護対策、法的（制度的）支援の整備など、多くの課題が存在する。そこで、これらを、(1) 船舶を活用した新システムの設計、(2) 船舶への海上前線基地機能の付加、及び(3) 海上移動型モニタリングシステムの開発、という 3 つのテーマに分類し、各々をさらに 3 つのサブテーマに分けて検討した。

テーマ(1)「船舶を活用した新システムの設計」に関しては、全国の文科省管轄の商船系・水産系教育機関（7 大学、5 高専）所属の船舶の調査を行った。商船系船舶は基本的には母港に停泊しているが、水産系船舶は実習だけでなく海洋観測にも出航しており、かなりタイトなスケジュールとなっていることが分かった。これらの船舶の現在位置は AIS（船舶自動識別装置）を利用して把握できるので、再委託先である大島商船高専を中心にして、これら全船舶を表示するシステムを完成させた。本システムを運用すれば、目的とする発電所サイトに向かう適切な船舶が判断できるようになる。運航員を対象とした放射線教育については、再委託先である量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所人材育成センターと協力し、研修プログラム内容を改訂して、深江丸（神戸大学）海事職員と学生に対して実習を試行した。また、法的支援の検討の一環として、原子力発電所が立地する 13 道県すべての防災担当者に連絡を取り、アンケート形式で放射線モニタリングと船舶の活用に関する実態調査を実施した。さらに、再委託先である福井大学と協力して、福井県及び敦賀市の担当者との意見交換会を行った。また、原子力発電所が立地する自治体担当者に参加頂き、シンポジウムを開催して意見交換を行なった。

次に、テーマ(2)「船舶への海上前線基地機能の付加」については、船内の放射線防護対策、遮蔽補強及び通信機能の設置というサブテーマを設定した。本システムにおける放射線計測系の中心となる船外モニターについては、基本設計・詳細設計・機種選定の順で検討し、絶対感度及びエネルギー分析機能という条件からシンチレーション式検出器を選んだ。船舶レーダーによるノイズ対策が必要となったが、最終的に実海域で運用しその性能を確認した。また、万が一放射性物質を含むプルームが船舶に近づいた場合、及び最悪のケースとしてプルームに覆われた場合を想定して、船内の放射線分布を計算し、防護対策について検討した。この結果、深江丸の場合には、学生居室が避難場所として適していることが分かった。なお、通信機器としては、計画より先行して開発が進み、小型 PC と電源を含めた全体のシステムを 2 年目（平成 28 年度）に完成させ、深江丸で運用した。

最後に、テーマ(3)「海上移動型モニタリングシステムの開発」では、搭載する放射線測定器、ドローン搭載用小型測定器、及び無人小型ボートの選定を目的とした。汚染検査用、空間線量率

測定用、及び個人線量計の各々については1年目（平成27年度）に機種選定を行い、それらをパッケージ化して3つのアルミニウムケースに格納した。移動型放射線計測器を搭載するドローンについては、海上で運用しその性能を確認した。神戸市深江から和歌山県御坊沖までの航海実験から、約8 m/s以下の風であれば正常に動作できることを確認した。また、小型ボートに関しては、国内外で市販されている無線操縦可能な全天候型ボートを調査して、自律航行可能性、取扱いの容易性、母船からの投入・揚収の簡便性などの条件を付加して機種を選定した。予想以上に高価であったため、業者から借用して内部を改良し、実海域での実験を行い、無線操縦しながら放射線モニタリングができることを確認した。

1. はじめに

平成 23 年に発生した福島第一原子力発電所事故（以下「福島原発事故」という。）から 7 年、原子力発電所の安全性、安全管理体制や原子力防災体制など色々な項目について様々な観点からの検証が進められている。原子力規制庁、東京電力や日本原子力学会など国内諸機関・団体の事故調査委員会による独自の検証に加えて、UNSCEAR（原子放射線の影響に関する国連科学委員会）、IAEA（国際原子力機関）及び ICRP（国際放射線防護委員会）など国際機関による検証も進んでおり、ここ 2 年間でも、UNSCEAR による 2 回目の報告書、IAEA のアクションの一環として IRRS（総合規制レビューサービス）による我が国の安全体制に対する是正勧告も行われるなど、一時の混乱状態から脱して今後の安全性確保に向けた積極的かつ建設的な議論が行われている。

これらの中でも、住民の被ばく線量評価については、やはり初期の内部被ばく線量の推定が困難であることが、最重要課題の一つとして指摘されている。外部被ばく線量はモニターの指示値を一部補正によって評価できるのに対して、ヨウ素等の短半減期核種による内部被ばく線量の評価においては、それらの摂取量の正確な推定がキーポイントとなるが、事故（放出）直後の測定が不十分であった場合には、相当時間経過後の測定値と SPEEDI（緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム）による推定値から遡及的評価に頼ることになってしまう。従って、評価線量の精度を上げるには、原子力発電所の近隣における可能な限り早期の正確なモニタリングが必要である。

陸上の交通網、電力網及び通信網が破壊され、オフサイトセンターや放射線モニタリングシステムの機能がほぼ喪失してしまった福島原発事故の教訓を踏まえると、原子力施設の多くが沿岸部に集中している我が国では、もう一つの経路、即ち「海の道」の利用が有効であると考えられる。海上での放射線モニタリングは、複雑な地形による影響が少ないため、陸上でのモニタリングに比べて精度良いデータを提供できるという利点もある。もともと船舶には、大量物資の輸送や避難者の搬送という運搬性を備えているが、その機能だけでなく、海上を自由に航行する機動性や、発電設備・水・食料・船舶電話等の常備による自立性（独立性）をも兼ね備えている。このような特長を生かした新たなシステムとして、本委託事業では、陸上のオフサイトセンターの機能を補完し、場合によっては一時的に代替する「船舶を活用した海上前線基地の設置と海上移動型モニタリングシステムの確立」を目指すことにした。このような新たな海上からのモニタリングシステムの設計・構築のための具体的なテーマを種々の観点から検討し、最終的に関連諸機関への提言をまとめることを目標とした。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本委託業務においては、「船舶を活用した海上前線基地の設置と海上移動型モニタリングシステムの開発」を目指した。このオフサイトセンターをバックアップするシステムの構築のためには、緊急時に必要な測定機器や補修機器等ハードの整備と十分な教育訓練プログラムの策定を前提として準備し、原子力災害時に速やかに船舶を利用した災害対応を実施することが可能な仕組み作りとチーム編成を確立しておく必要がある。このような国家規模の課題のすべてを一気に解決することは困難である。そこで、この実現に向けた第一段階として、文部科学省管轄の教育機関が現有する施設・設備・研究機器と人的資源を用いてこの課題に取り組み、新たな海上でのモニタリングシステムの設計・構築のためにはどのような具体的な問題があるか、また現状では何が不足しているかを種々の観点から検討することにした。さらに、原子力・放射線に関する技術・知識と、教育機関で所有している船舶やこれまで培われてきた災害科学の知見とを融合させ、上記の課題を洗い出し、最終的に国、原子力規制庁や関連諸機関への提言をまとめることを目標とした。

図 2-1 は、このために検討しておくべき課題をまとめたものである。

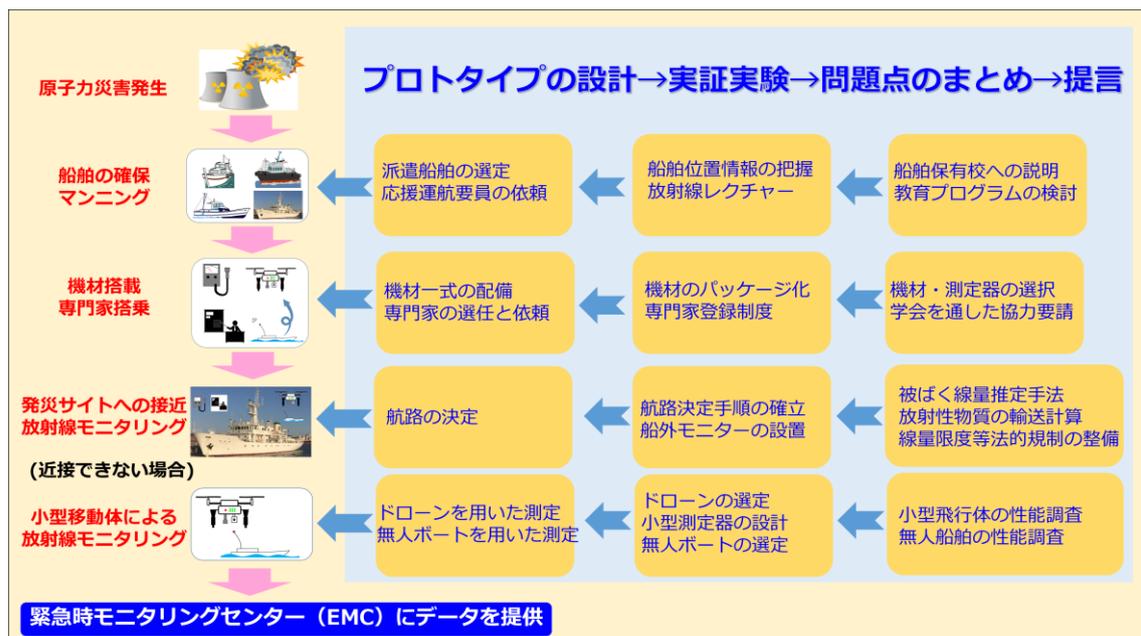


図 2-1 船舶を活用した海上前線基地設置のための検討課題

図中左側には、原子力災害が発生してから、海上からの放射線モニタリングを行うまでの準備項目及び手順を時系列に上から下に並べている。即ち、まず事前に登録された船舶のうち、最も早く出航準備が可能で発災サイトへ接近できる船舶を決定する。同時に、補助者を含めた運航要員を確保し、船長・甲板長に必要な燃料・水・食料等の調達を依頼する。一方、通常の船舶に、放射線測定のための前線基地としての機能を付加する必要があり、放射線モニターや個人線量計、放射線遮へい用具、除染用具等の安全管理のための機材を船舶に搬入する。このための時間を短縮するためには、事前にこれら機材をパッケー

ジ化しておき、国内の主要地点に配備しておくという措置も必要である。また、これも事前に登録しておいた放射線・原子力の専門家の中で、出動する船舶停泊地に速やかに移動できるメンバーに依頼して搭乗して頂くことになる。これら機材の搬入や専門家の搭乗については、場合によっては（時間が切迫する場合には）ヘリコプターの使用も考慮しておくべきかも知れない。以上の準備が整えば船舶が出航し、発災サイトに向かうことになる。この時、乗組員の被ばく防止の観点から、船舶に取り付けた放射線モニターを見ながら、あらかじめ設定した放射線レベルを超えないように近づく。また、その時点で、発電所から放射性物質が放出されたと仮定して、その後の放射性プルームの移流・拡散を予測しながら、それらを回避できるような航路を設定することになる。その場合でも、船舶（母船）から、ドローンなどの小型飛翔体や、無線操縦小型船舶或いは自動航行機能を有する移動体を降ろして、内蔵した放射線測定器及び通信機器によって放射線データを取得する。こうして得られたデータは、船舶に配備されている（衛星回線等による）独立した通信網を活用すれば、緊急時放射線モニタリングセンターやオフサイトセンターに送信できる。

図 2-1 の右側の枠は本委託業務で行う具体的な検討項目をまとめたものである。上述の手順に従って迅速かつ円滑に出航準備を行うためには、いくつかの事前準備が必要である。それらを最終的に運用段階にまで進めるための検討過程を、図の枠内の右から左の順に並べている。本委託業務では、フィージビリティ・スタディとして、文部科学省が保有する練習船を対象としているので、船舶の確保・マンニングのためには、事前に船舶保有校に本システムの趣旨を説明し、了承の上でネットワークに参画して頂く必要がある。また、これら船舶の位置情報を把握するシステムを構築しておけば、有事の際に派遣船舶を選定することができる。ただし、これまでの経験から、運航員の多くは公衆と同様に放射線に対する知識が少ないため忌避感が強いことには配慮しておくべきである。従って、通常の放射線教育プログラムに若干改良を施して、事前にレクチャーをしておくべきである。次に放射線モニタリングのための海上基地とするために、事前に必要な放射線機材を準備しておくことになるが、できるだけコンパクトとするため、種々の測定器等から最も適切な組み合わせを検討・選択し、それらをパッケージ化して配備するという手順で検討を進めた。専門家ネットワークについては本事業の範囲外となっているが、本事業に基づく提案内容を関連学会等で紹介し、賛同頂いた専門家を登録することとしている。最後は、サイトへ近づいて放射線モニタリングを実施するという段階である。これには、上述のように、放射性物質の移流・拡散の計算と船内被ばく線量の推定手法を確立させておき、近接航路が決定できるようにしておく必要がある。放射線測定器としては、船舶に搭載する放射線モニターの選定だけでなく、補助システムとして、小型飛翔体や小型舟艇の活用も視野に入れておくべきであると考えている。

本委託業務では、これらの具体的な検討課題をサブテーマとして次のように整理した。

- (1) 船舶を活用した新システムの設計
 - ① 全国の教育機関所属の船舶のネットワーク
 - ② 船舶関係者に対する放射線教育プログラムの構築
 - ③ 原子力防災体制の強化策の提案
- (2) 船舶への海上前線基地機能の付加
 - ① 船外放射線モニターの設置と船内の放射線防護対策
 - ② 高線量率或いは高放射能濃度環境対策としての船内線量計算と遮蔽補強
 - ③ 通信基地としての機能も有する船橋の設計
- (3) 海上移動型モニタリングシステムの開発
 - ① 船舶に搭載する放射線モニタリング装置のパッケージ化
 - ② ドローン搭載用放射線測定器の選定／設計／改造
 - ③ 無人小型ボートによる緊急時及び平時の放射線モニタリング技術の開発

このプロジェクトを実施するため、図 2-2 に示すように、神戸大学大学院海事科学研究科が中心となり、研究基盤センター（ラジオアイソトープ部門）と海技教育センターとの学内連携に加えて、船舶ネットワーク(1)-①について大島商船高専と、測定システム開発(3)-②及び放射線レクチャープログラム開発(1)-②に関しては量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所と、さらに、法的問題の検討(1)-③については自治体との協働体制で実績のある福井大学附属国際原子力工学研究所との共同体制とした。

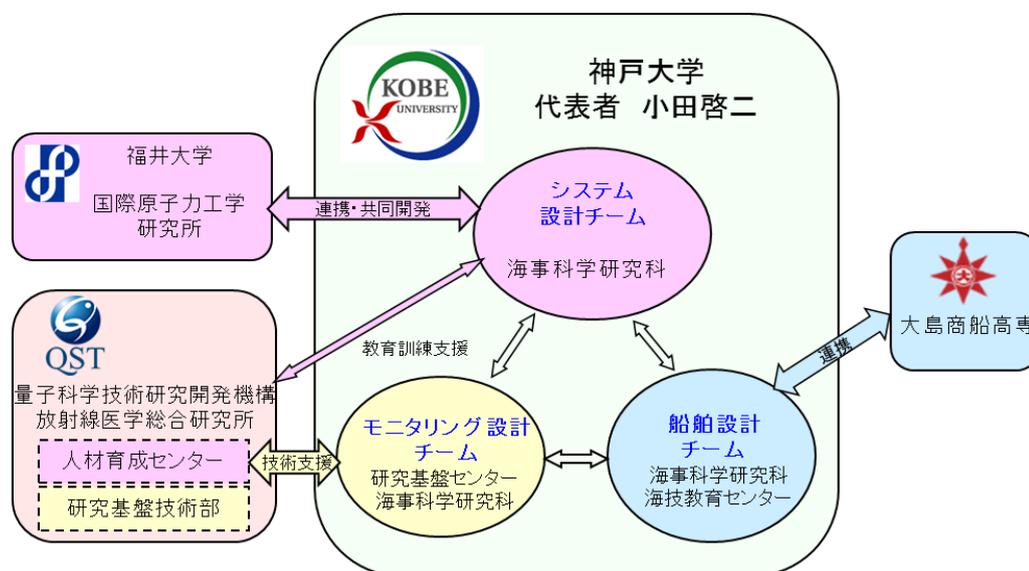
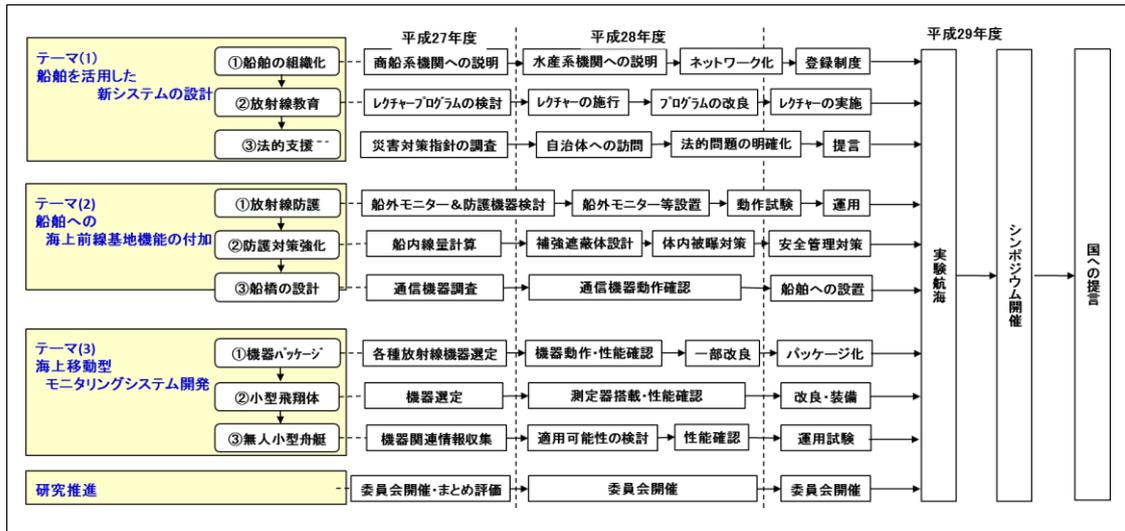


図 2-2 本委託業務の実施体制

テーマごとのスケジュールを表 2-1 にまとめる。

表 2-1 本委託業務の実施スケジュール



最終年度（平成 29 年度）には、本事業の最終成果の確認のために、神戸大学練習船「深江丸」及び「大島丸」（大島商船高専所有）を用いた実証実験を実施した。放射線測定システムや防護装備等一式を搭載し、放射線専門家及び本事業関係者が乗船し、原子力発電所（伊方）またはその代替として火力発電所（御坊）周辺を航海し、実海域における機器の動作確認を行った。

また、シンポジウムを開催し、それまでの研究結果及び航海実験の結果を公表した。ここでは、緊急対策立案を担当する省庁や自治体関係者を含む防災対策専門家を招待し、緊急時の船舶活用に関するディスカッションを行った。さらに、原子力規制庁、防衛省、国土交通省、海上保安庁、及び自治体の防災担当者との個別の意見交換の内容も踏まえ、最終的な提言をまとめて上記関係者に配布した。

2.2 各年度計画及び業務の実施方法

本委託業務では、陸上交通網が破壊されるような大規模自然災害時を想定し、安全システムの多重性（既存システムの補完）の観点から、船舶を活用した「海の道からのアプローチ」による放射線データ収集システムの開発を通して、現在の原子力災害対策の強化に関する提言をまとめることを目的とした。

各サブテーマの概要と再委託先との関係は以下の通りである。

【H27 年度】

(1) 船舶を活用した新システムの設計

① 全国の教育機関所属の船舶のネットワークの構築（神戸大学、大島商船高等専門学校）

他の商船高等専門学校（富山、鳥羽、弓削、広島）へのアクセスに加えて、船舶を有する大学及び水産系学部等へ、本プロジェクトの趣旨と目的を説明しネットワークへの参加の呼びかけを実施するとともに、ネットワークの構築に向け検討する。

② 船舶関係者に対する放射線教育プログラムの構築（神戸大学、放射線医学総合研究所、大島商船高等専門学校）

放射線医学総合研究所人材育成センターが中心となり、大島商船高等専門学校の協力を得ながら、船舶関係者に対して放射線教育と研修を試行して、既存の教育プログラムの課題を抽出し、検討する。

③ 原子力防災体制の強化策の提案（神戸大学、福井大学）

福島原子力発電所事故後に改訂された「原子力災害対策指針」の確認及び現時点での原子力防災体制の調査を行い、それらの問題点や改良点がないか検討するとともに、船舶を活用した「海上の前線基地」という観点を導入した場合の有効性と問題点を整理する。

(2) 船舶への海上前線基地機能の付加

① 船外放射線モニターの設置と船内の放射線防護対策

船外の放射線環境を仮定したシミュレーション結果を参考にして、適切な船外放射線モニターの機種及び設置候補場所を検討する。また、他の大型船舶での実施例を調査した上で、空間的制約と隔離性を考慮し、放射性物質取扱いのための管理区域の設定やコンテナラボ設置等の対応策を検討する。

② 高線量率や高放射能濃度環境対策としての船内線量計算と遮蔽補強

船舶が設定レベルを超える高線量率・高放射能濃度下に置かれるという状況を想定し、有効な複数の放射線防護対策を検討する。具体的には、揮発性及び気体状核種の動態を仮定したモンテカルロ計算によって船内の線量分布を推定し、被ばく低減のための避難スペースの確保及び遮蔽体の補強等の対策を検討する。

③ 通信基地としての機能も有する船橋の設計

船舶に設置する放射線測定器及び無人小型ボート・ドローンに搭載する測定器のデータは、一旦船舶に送信し、ここから船舶独自の通信を用いて衛星通信を通して地上にデータを送る構成を計画しており、通信機器の選定やデータ量・通信速度等の通信

システム全体を設計する。また、通常の運航統括機能に加えて、船橋（ブリッジ）に通信基地としての機能を持たせるための機器配置（スペースの確保）等を設計する。

(3) 海上移動型モニタリングシステムの開発

① 船舶に搭載する放射線モニタリング装置のパッケージ化

十分な精度で線量率測定が可能であること、対象核種の分析が可能なエネルギー分解能を有していること、パッケージ化できることに加えて、船舶の揺動や通信データ量の制約も考慮に入れて、船内に持ち込む放射線測定器一式（複数の測定器、データ処理装置等）の候補を選定する。

② ドローン搭載用放射線測定器の選定／設計／改造（放射線医学総合研究所）

陸上及び飛行体によるモニタリングとして既に実用化されている技術を調べ、転用できる技術と開発すべき技術を明らかにした上で、ドローン搭載用小型放射線測定器候補を選定（一部、機器の試験及び改良を含む）する。

③ 無人小型ボートによる緊急時及び平時の放射線モニタリング技術の開発

母船が近づけないような高放射線レベルの状況下では、ドローンによる測定やそれを搭載した無人小型ボート（無線操縦方式含む）の活用を想定しており、この測定システムに不可欠な無人小型ボートに要求される排水量、速度や操縦性等の性能をまとめるとともに、国内外の市販品や研究段階のボートを含めて調査する。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、研究実施計画等を協議するため委員会を開催する。

【H28 年度】

(1) 船舶を活用した新システムの設計

① 全国の教育機関所属の船舶のネットワークの構築（神戸大学、大島商船高等専門学校）

船舶を有する大学等教育機関に対して本プロジェクトの趣旨と目的を説明しネットワークへの参加の呼びかけを継続するとともに、各機関所属練習船の運航状況など諸データを集約する。

② 船舶関係者に対する放射線教育プログラムの構築

（神戸大学、量子科学技術研究開発機構、大島商船高等専門学校）

大島商船高等専門学校及び神戸大学の船舶関係者に対する放射線教育や研修を実施するとともに、それらへの参加者に対するアンケート結果の分析を通して、既存の教育プログラムの改善を図る。

③ 原子力防災体制の強化策の提案（神戸大学、福井大学）

「船舶を活用した海上前線基地の導入」という観点から、原子力災害対策指針の詳細な検討を行う。また、いくつかの原子力発電所立地地域における防災対策の現状及び海外の動向を調査するとともに、防災対策担当者等との合同の検討会・勉強会を通して船舶活用の有効性と問題点を整理する。

(2) 船舶への海上前線基地機能の付加

① 船外放射線モニターの設置と船内の放射線防護対策（神戸大学）

選定した船外放射線モニターを実際に練習船深江丸に設置し、実習航海時に動作確認を行う。また、安全管理区域内における放射性物質取扱基準案の策定や除染対応策の検討を行う。

② 高線量率や高放射能濃度環境対策としての船内線量計算と遮蔽補強（神戸大学）

揮発性及び気体状核種の動態を仮定した船内線量分布評価の精密化と区域分割の精細化を図り、船橋（ブリッジ）や居住区域における外部被ばく低減のための遮蔽体補強対策をまとめる。また、内部被ばく低減の観点から、船内空調システムを調査し、ヨウ素フィルター等の必要性について検討する。

③ 通信基地としての機能も有する船橋の設計（神戸大学）

通信機器を練習船深江丸の船橋に設置し、船上での動作確認を行う。また、放射線測定器からのデータを含めた運航データ集約システムを仮運用するとともに、通信回線使用料を勘案した実効的な通信データ量・通信速度の最終設計を行う。

(3) 海上移動型モニタリングシステムの開発

① 船舶に搭載する放射線モニタリング装置のパッケージ化（神戸大学）

船内に持ち込む放射線測定器一式（複数の測定器、データ処理装置等）の選定を行う。平成 27 年度に購入した機器については、それらの特性試験の後に練習船深江丸に持ち込み、動作を確認する。また、アルミ製容器へのパッケージ化を行う。

② ドローン搭載用放射線測定器の選定／設計／改造（量子科学技術研究開発機構）

小型放射線測定器の特性試験を行うとともに、リアルタイムデータ送信機能の付加を含めた改良や高性能化に関する検討を行う。また、ドローンを入手し、操縦性など諸特性を把握する。

③ 無人小型ボートによる緊急時及び平時の放射線モニタリング技術の開発（神戸大学）

市販の無人小型ボートの性能調査を行うとともに、気象・海象の影響を受けにくい水中走行移動体に対象を広げ、それらの性能を比較することによって平成 29 年度の実験に使用するボート（移動体）の候補を絞り込む。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を聴きながら研究を進めるため委員会を開催する。

【H29 年度】

(1) 船舶を活用した新システムの設計

① 全国の教育機関所属の船舶のネットワークの構築（神戸大学、大島商船高等専門学校）

大学等教育機関が保有する練習船の運航スケジュールを集約するとともに、自動船舶識別装置を利用して各機関所属練習船の現在位置情報を表示するシステムを構築する。

② 船舶関係者に対する放射線教育プログラムの構築（神戸大学、量子科学技術研究開発機構）

量子科学技術研究開発機構における研修内容を組み込んだ船舶関係者用放射線教育プログラムを作成するとともに、実際の放射線教育に必要な機材を整備する。

③原子力防災体制の強化策の提案（神戸大学、福井大学）

国内外における災害時船舶活用の現状に係る調査を実施するとともに、原子力防災体制に関するシンポジウムを開催し、原子力発電所立地地域の防災対策担当者等との議論を通して、船舶を活用した放射線モニタリングの有効性と課題を整理する。最終的にそれらの成果を提言書としてまとめ、原子力防災関係者等に配布する。

(2)船舶への海上前線基地機能の付加

①船外放射線モニターの設置と船内の放射線防護対策

実海域での実験航海を行い、練習船深江丸に設置した船外放射線モニターを運用する。また、予期せぬ放射線被ばく状況を想定して、被ばく低減策及び除染対応策の実証を行う。

②高線量率や高放射能濃度環境対策としての船内線量計算と遮蔽補強

線量計算のより一層の精密化を図り、船外放射能濃度と船内線量率分布との定量的な関係をまとめる。また、内部被ばく低減の観点から、空調フィルターの性能を確認する。

③通信基地としての機能も有する船橋の設計

実海域での実験航海を行い、練習船深江丸に設置した通信機器を運用するとともに、放射線データとの集約化を行う。また、通信回線使用料と通信性能との関係を整理して、最適な通信システムを提言する。

(3)海上移動型モニタリングシステムの開発

①船舶に搭載する放射線モニタリング装置のパッケージ化

アルミ製容器を用いてパッケージ化した放射線測定器一式を練習船深江丸に持ち込み、実海域での実験航海を行う。

②ドローン搭載用放射線測定器の選定／設計／改造

(神戸大学、量子科学技術研究開発機構)

昨年度までに設計した小型放射線測定器を実際にドローンに搭載し、実験航海において、船上からの離発着時の操縦性や気象による影響を確認する。また、放射線データ通信システムを運用し、その有効性を実証する。

③無人小型ボートによる緊急時及び平時の放射線モニタリング技術の開発

昨年度までの調査によって絞り込んだ無人小型ボートを借用し、海域での実験を行って、性能及び実用性を確認する。

(4)研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、広く意見を聴きながら研究を進めるため委員会を開催する。

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 船舶を活用した新システムの設計

3.1.1 全国の教育機関所属の船舶のネットワークの構築 (H27~H29)

(再委託先：大島商船高等専門学校 (運航情報システムに関する事柄))

図 3-1 は、原子力発電所サイトと練習船を有する商船系大学・高専 (大学：神戸大と東京海洋大海洋工学部、高専：富山・鳥羽・広島・弓削・大島) 及び水産系学部 (北大、三重大、長崎大、鹿児島大) の立地場所を示している。このように、事前にこれら大学・高専の理解が得られるならば、(日本海側が手薄になりそうではあるものの) 発災したサイトに最も早く到着できる練習船が急行するというネットワークが整備できそうである。

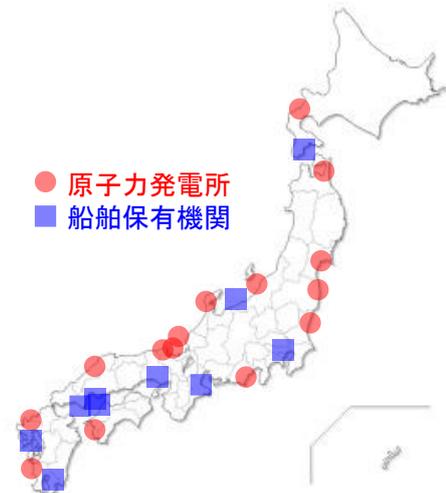


図 3-1 国内の原子力発電所と商船・水産系教育機関の立地場所

【H27~H28 年度】

まず、全国の文科省管轄教育機関所属の船舶の現状を調査した。それぞれ船舶の用途は異なるが、毎年整備ドックに入渠しながら、長年にわたり使用していることが分かった。中には 30 船齢に近づいている船もあり、国の負債が多大となる中、代船建造は容易とはなっていない状態が続いている。

次に、各校の理解を得るため順次説明に回った。商船系 7 校については、神戸大学が主管となって開催している「海事・商船系大学・高等専門学校懇談会」の席上を借りて、本プロジェクトの説明と協力依頼を行った。また、東京海洋大海洋科学部 (旧東京水産大)、高知大、北海道大学を訪問した。一方、再委託先である大島商船高専のチームは、広島商船高専、鹿児島大及び長崎大を担当し、本プロジェクトの概要説明と練習船の運航状況に関する意見交換を行った。

【H29 年度】

平成 28 年度後半には、各機関が保有する練習船の運航状況、及び、緊急時の対応に関する情報を収集し、練習船の運航スケジュールを集約することに加え、自動船舶識別ツールを利用した各機関所属練習船の現在位置情報を表示するシステム作成に先行的に取りかかっており、平成 29 年度ではこのシステムを完成させた。

まず、本事業の関心を示している 3 大学、5 高専の 8 隻の練習船のスケジュール (平成 30 年度) を入手した。紙ベースのもの、ファイルベースのもの様々であったが、すべて PDF 化することにした。なお、これらを同表示システムにアップし、可搬的に Wi-Fi 電波が届く場所でも、各船の運航情報を確認可能とするために、本システムはホームページ化し、外部に開かれたサーバー上にアップロードできるようにした (以後、「練習船・運航情報表示システム HP」と表記する)。同 HP のトップページには、将来連携校を拡大していくことを視野に入れ、「大学・高専練習船」と「地方公共団体・教育機関 (高校)」とにカテゴリーを分け、

選択できるようにした。いずれかを選択すれば、各教育機関所有練習船の主要目表が表示されるようにした（図 3-2 参照）。各練習船の主要目の中で、「船名・運航予定」欄にあるリンクをクリックすると、選択した練習船の「平成 30 年度運航スケジュール」が表示されるようにした。なお、この内容は毎年更新することになる。

大学・高専	種別	船名 年間予定	最近の 動向	竣工年	定系 港	航行区域	総トン 数(GT)	全長×幅×深さ(m)	満載 喫水 (m)	速力 (kt)	連続 最大 出力(KW)	航続 距離 (マイル)	乗組員	その他	実習生 ベット数	
北海道大学	練習船	おしよ丸(V)	1	2014		遠洋	1598	78.27*13*5		12.5	2000	10000	32	67		
	練習船	うしお丸					179									
東京海洋大学	練習船	神鷹丸(IV)		2016	東京港	遠洋		65*		12	1600			76		
	練習船	海鷹丸(IV)		2000	東京港	遠洋	1886	93*14.9*8.9		17.4	4489		47	60	107	
	練習船	青鷹丸		1988	東京港		170	35.5*		11.5						
	練習船	湖路丸		1987	東京港		425	49.9*10.0*7.0	3.8		1030KW					
三重大学	練習船	勢水丸					320	50.9*8.6*	3.3	12	1000	3500	16	28	26	
神戸大学	練習船	深江丸			神戸港			49.9*10.0*6.9	3.8	12.5	1100KW	3000	10	52	48	
広島大学	練習船	豊潮丸		2006			256	40.5*8.5*3.7		10.5		2900	12	20	18	
長崎大学	練習船	長崎丸	2	1986			842	63.9*11.4*7.1	4.5	13.5					50	
	練習船	鶴洋丸		2004			155	35.4*7.0*3.2	2.5	15	1050KW	3200	15	18	16	
鹿児島大学	練習船	かごしま丸		2012	谷山港		935	66.9*12.1*7.0	4.6	12.5	800KW				44	42
	練習船	南星丸		2002			175	42.0*7.5*3.3		12	1800PS				11	
富山高専	練習船	豊潮丸	4	1995	高山県 射水市	近海	231	53.6*10.0*3.4		11.5	956	1056	9	47	44	
鳥羽商船高専	練習船	鳥羽丸	5	1994	三重県 鳥羽市	近海	244	40.0*8.0*3.3		12	956	2300	9	47	44	
弓削商船高専	練習船	弓削丸	6	1994	愛媛県 弓削島	近海	240	40.0*8.0*3.3		12	956	2300	9	47	44	
広島商船高専	練習船	広島丸	7	1996	広島県 大崎上島	近海	234	57.0*10.2*5.5		12.5	956	2100	9	47	28+(16)	
大島商船高専	練習船	大島丸	8	1993	山口県 周防大島	近海	228	41.0*7.6*3.5	2.2	12	960	1100	9	49	44	
東海大学		望星丸		1993			1777	88.0*12.8*8.1	4.8	15			33	157	140	

図 3-2 大学・高専のカテゴリーで表示される各練習船主要目

次に、直近 1 日程度の動静と位置情報を表示できるようにした。これは、災害時にその地域に最も近く急行できる船舶を知るために必要である。この機能に関しては、フリーツール「Marine Traffic」(https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:132/centery:34/zoom:8)を用いた。練習船「大島丸」を選択すると、図 3-3 のように、直近 1 日間の動きが表示される。

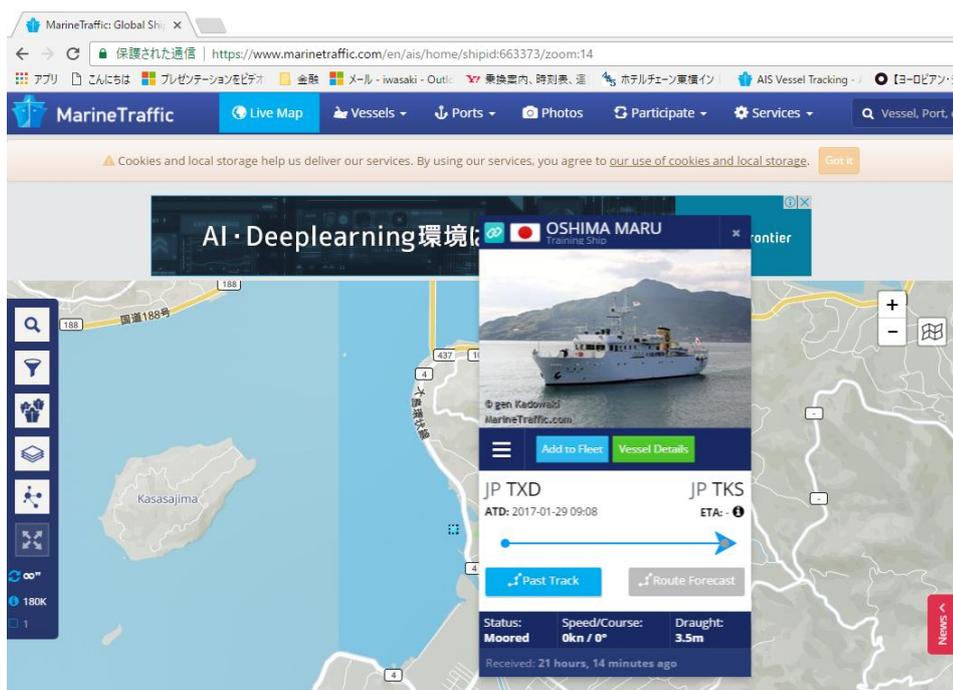


図 3-3 選択した練習船の現在位置と最近 1 日の航跡

このように、各機関が保有する練習船の運航状況、緊急時の対応に関する情報、及び練習船の運航スケジュールをまとめて把握できるようにし、また、自動船舶識別ツールを利用して各機関所属練習船の現在位置情報を表示するシステムを構築して、実際に運用できることを確認した。

3.1.2 船舶関係者に対する放射線教育プログラムの構築 (H27～H29)

(再委託先：量子科学技術研究開発機構)

前節で述べたような船舶ネットワークが完成し、有事の際の調達が可能となったとしても、それを動かす船舶運航要員の確保（マンニング）ができなければ出動はできない。福島第一原子力発電所事故時の海洋汚染状況の調査の必要が指摘されてから、事業者（東京電力）や国が船舶を用いたモニタリングを行えるようになるために相当時間（少なくとも2～3週間）を要したことからマンニングの問題、中でも船舶運航要員の放射線被ばくに対する不安軽減のための「放射線レクチャー」の重要性が窺える。

そこで、再委託先である量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所（以下、放医研。）の人材育成センターを中心にこの問題に取り組んだ。

【H27～H28 年度】

放医研人事育成センターでは、対象者の知識・技術レベルに応じて多くのパターンの教育プログラムを有している。それらの中で、海上原子力防災研修（海上保安庁職員対象）と自治体職員を対象とした内容を参考にして、船舶関係者への放射線研修プログラムとして改訂することを試みた。

海上で原子力防災等の活動を行うには、放射線の専門家ばかりでなく、船舶関係者の協力が必要である。東電福島原発事故において初めて原子力災害に対応しなければならなくなった自衛隊、消防、警察等の初動対応者や地方自治体職員は、放射線の知識がないことから、漠然として不安を持ったまま対応に当たった方が多かった。放射線はそのレベルが重要であるが、放射線、放射性物質の存在のみで不安になったり、線量限度レベルを超えるとすぐに、人に影響をもたらすと勘違いしていた関係者も多かった。このことから、船舶関係者は、まず、放射線の基礎知識、人体影響、放射線防護に関する知識と技能を身につけ、これに加え、地上と異なる海上の特殊性にも触れることも必要であると考えた。

なお、平成27年度には、再委託先のひとつである大島商船高専と協力して、船舶職員を指す同校商船学科3年生、「大島丸」海事職員及び技術職員を対象として試行した。

【H29 年度】

前年度までの検討を踏まえて船舶関係者への放射線研修プログラムを構築した。

放射線の授業を受けたことのない対象者にとっては、放射線について基礎的な知識を重視する必要があるが、放射線、原子力関係を専攻していない船舶関係者にとっても研修項目を、それほど変更する必要はないと思われる。また、船舶関係者はももとの業務量が多いことを配慮して放射線研修は2日間とし、放射線に関する基礎知識から実際

の活動現場への応用までを効率よく学ぶことができるように設定した。表 3-1 に時間割を示す。

表 3-1 船舶関係者への放射線研修時間割

時間	講義タイトル	内容	
1日目			
第1日 ; 放射線を知る			
9:00 - 9:30	0:30	開講式/プレテスト	
9:30 - 9:40	0:10	休 憩	
9:40 - 10:40	1:00	放射線の基礎と人体影響	放射線の基礎知識、人体影響など
10:40 - 10:50	0:10	休 憩	
10:50 - 11:50	1:00	放射線防護と汚染対策	放射線防護の3原則、線量基準、など
11:50 - 12:50	1:00	昼 食	
12:50 - 16:20	3:30	実習: 遮へい実験、防護衣着脱、施設設備の養生、汚染検査	様々な遮へい材を用いての放射線の透過率の変化、タイベックスーツの着脱、養生の仕方、汚染検査
2日目			
第2日 ; 対応を知る			
9:00 - 10:00	1:00	被ばく事故の歴史(第5福竜丸の事例など)	海洋上での事例を中心に、被ばく事故の歴史
10:00 - 10:10	0:10	休 憩	
10:10 - 11:10	1:00	東電福島第一原子力発電所事故の海洋への影響	汚染水等による海洋環境への影響、現在の状況など
11:10 - 11:20	0:10	休 憩	
11:20 - 12:20	1:00	放射性物質の海上輸送の現状	核燃料の海上輸送について
12:20 - 13:20	1:00	昼 食	
13:20 - 14:20	1:00	海上での防災対策(伊方原発を例に)	事故時の住民避難等による船舶利用について
14:20 - 14:40	0:20	総合討論	
14:40 - 15:00	0:20	ポストテスト/閉講式	

1 日目の午前は、放射線の基礎知識、被ばくによる人体影響、放射線防護の基本、被ばく・汚染対策といった放射線関連の災害や事故に対応する上で必要となる基礎的な事項を座学形式で学ぶ。午後は、全ての研修生が防護装備の着脱及び施設・設備の養生方法を実体験するとともに、放射線源と遮へい材を用いた遮へい能力の確認実験や体表面汚染の検査を行うという体験型実習を通して、より実践的に放射線への対応方法を学ぶ。2 日目は、船舶関係者向けに特化して、海上での事故の歴史、東電福島第一原子力発電所事故の海洋への影響と現状、放射性物質の海上輸送の現状、海上での防災対策などを学び、船舶関係者として押さえておくべき海上と放射線の関わりを知る。さらに総合討論を行うことで、学習内容の確認と疑問点を解消する。研修の前後でプレ・ポストテストを実施し、研修の効果を確認する。また、アンケートにより、研修生側からの意見・要望、研修の問題点を分析し、研修の改善に役立てることにした。

なお、この実習に必要な以下の機材を整備した。

- ・ GM 式サーベイメータ
- ・ NaI シンチレーション式サーベイメータ
- ・ 標準線源
- ・ 比較的自然放射能の高い消費財 (ランタンの芯、肥料、園芸用砂など)

- ・タイベックス（防護衣）
- ・防塵マスク（フィルター）
- ・養生シート

これらの内、放射線防護対策用品については、船舶に搭載することになる（3.3.1 節参照）。



図 3-4 放射線レクチャー（実習）に用いる機材

平成 27 年度に大島商船高専で実施した放射線レクチャー及びその後のアンケートの結果を踏まえて、平成 29 年度は深江丸において実習を行った。講義についてはほぼ同じ内容なので、船上での実習を中心に、以下にまとめる。

船上で実施する以下の 2 種類の実習（①防護衣の着脱と②施設設備の養生）について、深江丸の航海実験に参加した関係大学の大学生、大学院生を対象に行った。これらは船上という限られた空間で行ったので、臨場感のある実習となり、さらに他施設で行う場合とは異なる課題を明らかにすることができた。

①防護衣の着脱

タイベックスーツ、シューズカバー、手袋、マスク（簡易マスクまたは半面マスク）を装着した。タイベックスーツの背中には作業者が特定できるように名前を記入した。汚染物質が入り込まないように、シューズカバー・手袋はタイベックスーツの上にかぶさるように装着し、さらにその上から養生テープでマスクした。また着脱時に効率よく外せるよう、テープの端は折り曲げた。手袋は作業中に新しいものへと装着し直しやすく、また安全性を高めるためにも、2 重に装着した。



図 3-5 防護衣などの着衣（放射線防護実習）

脱衣の際には、外側・内側の手袋の順に汚染させないように注意して外し、大きめのごみ袋内に入れた。シューズカバーと手袋の養生テープを外し、同様にゴミ袋に入れた。次にゴミ袋の内側に入り、タイベックスーツの内側を触らないようにタイベックスーツとシューズカバーを脱ぎ、それらをそのままゴミ袋内に残し、ゴミ袋内から抜いた足をクリーンエリアにおいて、クリーンエリアに移動した。マスクを外しゴミ袋に入れ、最後に手袋を外して、ごみ袋に入れた。

着衣は、活動前であることから、椅子もあり比較的広い空間である学生ホール（多目的ルーム）で行った。脱衣については、活動後であり汚染の可能性があることから、養生してある空間（廊下）をセミホットエリアとクリーンエリアに分け、その境界のセミホットエリア側で行った。シューズカバー、タイベックスーツを脱いだ直後に、クリーンエリア側に移動できるようにするためである。ただし、船内の廊下は非常に狭く、1名ずつの脱衣となるため、作業者が多い場合は効率が悪くなることが分かった。

②施設設備の養生

船外での作業者（タイベックスーツ着用）の出入り口として、複数箇所ある出入口のうち一か所のみを使用すると想定した。また、タイベックスーツを脱衣後にシャワーを浴びる必要がある事態を考え、出入口からシャワー室への通路（階段含む）を養生することとした。図 3-6 のように、出入口ドアより内側をすべて養生シートで養生した。船外での作業中は汚染物質が船内に入らないようにドアを閉めておき、作業終了後にドアを開けて船内に入るため、ドアと出入り口の接地面、船内側ドア取っ手も養生した（図 3-7）。

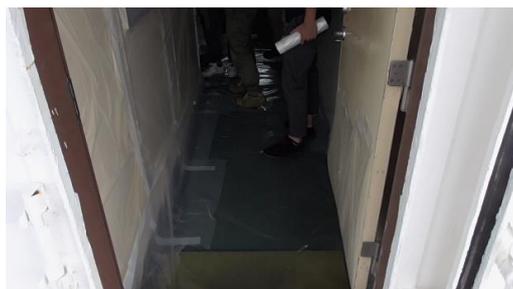


図 3-6 出入口からみた船内と養生風景



図 3-7 出入口の船内側ドアの養生

出入口からシャワー室（地下 1 階）までの通路（階段含む）の床、壁、天井をすべて薄めのビニール製養生シートで覆った。出入口付近から階段までの床養生に関しては強度が必要と考え、厚めの養生シートを用いた（図 3-8 参照）。1 階通路より地下 1 階へ降りる階段へのドア前はシートをたらし（図 3-9 参照）、汚染防止用の対策を図った。



図 3-8 出入口からの床部分の養生



図 3-9 天井からたらしした養生シート



図 3-10 階段の養生

階段部分は凹凸や付属品が多くあるため、図 3-10 のように、薄めのビニール養生シートで全体を覆った。しかしながら、階段部は養生することで滑りやすくなることから、シート材料の選択及び使用方法について検討が必要であることが分かった。例えば、ビニールシートの上に使い捨てのすべり止めなどを敷く方法が考えられる。もうひとつは、時間と手間がかかる方法であるが、ポリろ紙型の養生シートを使用し、階段の一面ごとに切り貼りすることも有効であろう。

今回の実習では使用する出入口は一か所としたが、実際には複数箇所の方がよいと判断した。出口と入口を分けることで、活動時の船内への出入りの自由度が上がること、及び、船内への入り口を複数用意することで効率よい脱衣が期待できる。

以上、放射線研修の中でも特に重要な放射線の基礎的知識の学習と防護措置実習を実施した。前者は放射線に関するすべての実習生に共通する重要な内容である。基礎的内容のレクチャーを受けることで放射線に対する知識の不十分さからくる不安の軽減につながり、適切で冷静な対処が期待できる。後者に関しても基本的な部分は共通した内容ではある。しかしながら、施設により細部が異なり、これが動線等に大きく関係するため、現場での模擬実習の実施が非常に重要であることが分かった。

3.1.3 原子力防災体制の強化策の提案 (H27～H29)

(再委託先：福井大学 (国内・海外の防災対策の現状に関する事柄))

従前の原子力災害への対応は、原子力施設から 20km 内に設置されたオフサイトセンター (OFC) が核となり、国・自治体・事業者・専門家など関係者が一体となって「原子力災害合同対策会議」を組織し、迅速に有効な対策を行うことになっていたが、福島原発事故の場合には、津波のためにこの陸上の拠点の機能が喪失した。その後の検証から、OFC に関する 10 項目以上の具体的課題が検討された。

本サブテーマでは、原子力防災体制の現状を把握するとともに、船舶を用いた海上移動型放射線モニタリングシステムが果たす役割をまとめることを目的とした。

【H27～H28 年度】

まず、原子力災害対策指針の現状を確認した。平成 27 年の段階では、OFC に関する上記改訂と同時に、原子力災害に関する情報のとりまとめや官邸をはじめとする中枢機関の当時の対応に関する検証と反省を踏まえて、中央と現地の国の拠点の関係を見直し、住民の避難指示には広域的に検討する必要があることや、事故の収束には国内外を問わず広く関係者の知見や多様な手段を活用して意志決定を行う必要があることから、基本方針は中央で行い、決定された方針に沿って災害対応を行う地域の現場での具体的なオペレーションの調整・実行については前線基地的な位置づけを担う現地対策本部が実施するようそれぞれの役割分担を明確に整理することとしている。

この中で、本事業に最も関係が深い放射線モニタリングについては、緊急時モニタリングセンター（EMC）の役割、体制及び運営方針が検討され、EMC は国が統括するものと位置づけられるとともに、緊急時モニタリングについては、国、地方公共団体、原子力事業者及び関係指定公共機関等が目的を共有し、それぞれの責任を果たしながら、連携して実施することとなった。

EMC は、原子力規制委員会・内閣府原子力合同事故対策本部（全面緊急事態以降では、原子力災害対策本部）の放射線班（ERC 放射線班）及び現地オフサイトセンターに設置される放射線班（OFC 放射線班）と連携する。このように、オフサイトセンターの位置づけが見直されるとともに、中央に置かれる災害対策本部の役割が強化され、情報の一元化と指揮系統の統一が図られている。新体制においては、防災計画や緊急時の避難だけでなく、緊急時の放射線モニタリングの指揮も災害対策本部で行うことになっている。つまり、災害対策本部の指揮の下で、現地の緊急時モニタリングセンターが計画を立て、自治体・事業者・指定公共機関等が実施することになっている。

次に、海上移動型放射線モニタリングシステムの新体制への組み込みを検討するに当たり、英国及び米国のシステムを文献調査して比較した。事故発生の際に迅速な対応及び情報の共有が重要であり、事故現場では事業者が対策の中心となり、地方公共団体や国が人員の派遣、助言を行うなどする点は共通している。しかし、日本と比べると、オフサイトでの意思決定の機関が異なっていることが分かった。英国では県が、また、米国では州政府がオフサイトでの中心的役割を担っており、防災計画を計画、実施することになっている。このような意思決定機関の違いから、迅速な対応が出来るのかという問題を提起することができる。現地だからこそわかる現状、現地にしかできない判断があるはずであり、一定の裁量権を与えるべきでないかという点も考慮に値するのではないかと思われる。

平成 28 年度には、原子力発電所が立地している 13 道県の地域防災計画、特に避難に関する項目及び、各道県で実施されている原子力防災訓練に関して公開されている情報をもとに調査を実施した。次に、より詳しい原子力災害対策を調べるため「原発立地道県の地域防災計画（原子力災害対策）」における船舶利用の現状を調査するアンケートを原発立地地域のすべての道県に実施した。特に本事業と関係のある海路を使った避難や物資の輸送、海上放

射線モニタリング、及び原子力避難訓練時の船舶利用の現状を調べた。

この調査結果から、地域防災計画内では多くの道県において住民避難のための船舶利用を計画していることを確認した。また、事故が起きた時の海上放射線モニタリングに関しては、積極的に行わないことが分かった。これは、必要に応じて国が実施することになっているためであるが、責任体制が不明確であり、自主的に放射線測定器を配備してモニタリングを行う自治体もあるなど対応が異なっている。国または OFC 放射線班の強い指導の下で実際には自治体が行うという体制の方が実効的ではないかと考えられる。

【H29 年度】

平成 28 年度に実施したアンケートでは、愛媛県のみ海上放射線モニタリングを実施していることが分かった。そこで、大島丸を用いた航海実験の打合せを兼ねて、愛媛県庁を訪問し、詳細を確認した。伊方原子力発電所は細長い半島に立地していることから、住民の一部の避難に船舶を活用することが組み込まれていることが確認できた。

また、放射線モニタリングへの船舶の活用に関して、原子力規制庁、防衛省、国土交通省にも聞き取り調査を行った。平時、緊急時及び住民避難時の各々におけるモニタリングの実施責任体制について一部曖昧な点が残されていることが分かった。

一方、海外における原子力災害時の船舶活用に関する調査も継続して行った。米国、オーストラリア、ニュージーランド、インド、中国、カナダ、フィリピン、スペイン、ペルーにおける事例を調査した結果、スペインが最も進んでおり、実運用の段階手前であることが分かった。放射線モニタリングへの積極的な船舶活用事例はその他には確認できなかった。米国や中国等では、海軍艦艇の高機能化（病院船化）という動きがあり、その一端は、福島第一原子力発電所事故時の在日米軍の活動（トモダチ作戦）に見ることができる。ここでは、米軍は最大時で人員約 24,500 名、艦船 24 隻、航空機 189 機を投入した大規模な活動を実施し、役割としては、物資の提供、人員の派遣、情報の提供という限定的となっていた。

このように、船舶を活用した緊急時放射線モニタリングシステムの既存の原子力防災体制への組み込みについて検討してきたが、専門家に加えて広く意見を聞くことを目的に、平成 30 年 3 月 16 日に原子力防災体制に関するシンポジウムを開催した。原子力発電所立地地域の担当者等を中心に 40 名の参加があり、船舶を活用した放射線モニタリングの有効性と課題を議論した。

まず、緊急時対応の専門家である占部逸正教授（福井大学）の講演では、「原子力災害時の放射線モニタリング」の概要と海上からのモニタリングの有効性が指摘された。難波江靖氏（海上保安庁上席研究官）からは、福島事故の由来する放射性物質の移行に関する調査結果と、海上保安庁が行っている放射線モニタリングの現状が報告された。米軍原子力艦が寄航する区域の専用小艇（放射能艇）の配備、及び放射線測定器の配備状況が分かった。

次に、本事業での成果を順次紹介し、その後の自治体原子力防災担当者等との意見交換では、避難時のモニタリング体制に関する意見が出され、今後の課題であることを確認した。



図 3-11 原子力防災体制に関するシンポジウムの様子

シンポジウムでの議論を踏まえて、これまでの検討結果に加えて 3.2 節及び 3.3 節で後述する検討結果の中から、重要だと思われる 6 点を提言書という形でまとめた。以下、3.1-11～3.1.16 ページにその内容を列挙する。

なお、原子力規制庁、防衛省、海上保安庁、国土交通省、及び、原子力発電所立地道県（北海道、青森、宮城、新潟、福島、茨城、静岡、石川、福井、島根、愛媛、佐賀、鹿児島）の原子力安全対策担当者に電子データとして配信した。

①陸上の交通網、電力網及び通信網が破壊されるような原子力災害時におけるバックアップシステムとして、「船舶を活用した海上放射線モニタリングシステム」を提案する。

・船舶は、運搬性に加えて機動性及び自立性が高いという特長を有している。

運搬性：避難者の運搬、大量の支援物資の運搬

機動性：海上を自由に航行可能

（津波等によって被災した港湾近海は除く）

自立性：発電設備、水・食料、独立した船舶通信

（おおよそ1～2週間程度は補給無しで航行可能）

・「海上前線基地」として緊急時放射線モニタリング機能の一部を担える。

緊急時の放射線モニタリングは、原子力災害対策本部内の放射線班と現地オフサイトセンター放射線班が連携する体制の下で緊急時モニタリングセンター（EMC）が担当するが、多重防護の観点から、これを補完するシステムを持つておくべきである。

・陸上交通（バス・鉄道）での移動が難しい住民の避難にも利用できる。

原子力発電所が立地されている13道県のうち、11道県で海路による避難及び物資輸送計画が立てられている。また、7道県では船舶を使った避難訓練を実施している。

・無線操縦小型ボートによる放射性物質の流出モニタリングにも利用できる。

小型無人ボートや自律型水中航走体（AUV）に放射線測定器を搭載すれば、事故時の放射性物質の流出量のモニタリングが可能である。現時点ではかなり高価であるが、今後の開発・性能向上によって、実際の運用が可能となる。また、航路を設定しておけば自走式小型航走体による平時モニタリングへも応用できる。

②緊急時に出動できる船舶を事前に登録しておき、それらの現在位置情報や運航状態を把握するシステムを整備しておくことが必要である。

・候補としては、自衛艦、海上保安庁の船艇や民間船舶（フェリー等）が挙げられるが、最も可能性が高いのは文科省管轄教育機関所有の練習船である。

原子力災害対策専用の自衛艦を防衛省に置くという案も考えられるが、数百億円以上と見積もられる建造費と専門知識を有するスタッフの編成を含めた維持費を考えると現実的ではない。

海上保安庁には、米軍原子力船寄港地を管轄する管区に「放射能艇」が配備されているが、海上前線基地としては規模が小さいことから、全国の原子力発電所をカバーすることが難しいと思われる。

災害時の民間船舶の活用については国土交通省で検討されているが、通常業務からの転用、運航員の確保等に大きな課題がある。

海事・商船系及び水産系の5高専（富山、鳥羽、広島、弓削、大島）・7大学（北海道、東京海洋、三重、神戸、広島、長崎、鹿児島）はおおよそ全国の原子力発電所をカバーできる範囲に立地していること、適当な規模（200～1500トン）であること、原子力・放射線専門家との連携が可能であることなどから、有力な候補であると考えられる。また、水産・海洋系高校や自治体所有の船舶もネットワークの構成メンバーとなる。

・AIS（自動船舶識別装置）を用いた登録船舶の状態把握システムが有用である。

連携校練習船の年間スケジュール表、及び「Marine Traffic」（フリーツール）を用いた位置情報表示を組み合わせた状態把握システムを試作した。これをベースに協力船舶ネットワークの拡大・整備が望まれる。

・複数船舶の協力が不可欠である。

教育機関所有の練習船は、国の経済状況によって代替船建造が遅れており船齢が高い船舶が多いこと、共同利用を含めた有効活用という流れから過密運航スケジュールになっていること等、課題も多い。海上前線基地として出動した練習船の本来業務（実習・教育）を周辺の練習船が支援するという協力体制を整備しておくべきである。このようなバックアップ体制は民間船舶を転用した場合も同じである。

③あらかじめ船舶運航担当者対象の「放射線レクチャー」を実施しておくべきである。

- ・船舶運航員が抱く放射線に対する恐怖感の緩和は不可欠である。

福島原発事故時の注水作業等の緊急作業に従事した自衛隊員や消防士、事故後の海域監視や海域での放射線モニタリングを担当した船舶関係者の一部からは、放射線被ばくに対して不安を感じたという声があったようである。「決死の覚悟」での作業は別の問題を引き起こす可能性があるため、事前の放射線レクチャーは必須であると考えられる。

原発立地自治体の防災体制の調査結果によると、住民避難の手段としてバスや電車の利用が計画されているが、これら運転者・運転士等に対しても同様な対策が必要であろう。

- ・2日間程度の放射線教育プログラムが適当である。

船舶関係者はもともと業務が多いことを考慮して2日間の研修日程を想定した。サンプルプログラムとして、1日目午前「基礎知識の講義」、午後「実験と実習」、2日目午前「船舶関係者特別講義」、午後「総合討論」という構成を提案する。各々の項目例としては以下のとおりである。

- 基礎知識・・・自然放射線、被ばくと汚染、線量、人体影響、放射線防護
- 実験実習・・・霧箱観察、遮へい実験、汚染検査、施設の養生
- 特別講義・・・海上事故例、福島原発事故と海洋汚染、防災対策
- 総合討論・・・グループ討論、質疑応答

- ・放射線医学総合研究所や専門教育機関等がサポートできる体制にある。

広範な分野の研修者を対象とした放射線教育・実習を体系的に行っているのは、量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所人材育成センターである。また、日本保健物理学会、日本放射線安全管理学会、日本原子力学会、日本医学放射線学会、日本診療放射線技師会などの学会、原子力・医学・保健学関係の学部・学科を持つ大学においても出張講義等の対応が可能である。

④万一の場合に備えて、船舶内での被ばくを抑えるためのいくつかの放射線防護策を提案する。

・高感度放射線モニターを船外に設置しておく。

陸上のモニタリングポストに相当する船外モニターとして優先される要件は絶対感度である。また、空間線量率に加えてエネルギー情報（パルス波高分布、スペクトル）が取得できることが望ましい。この観点から、高圧電離箱式よりシンチレーション式が適していると思われる。

なお、設置場所はレーダーの影響（ノイズ含む）に注意して設定すべきである。

・放射線輸送計算コードを用いて、船内の線量率分布を推定し、あらかじめ船内避難場所を設定しておく。

EGS5 や PHITS といった放射線輸送計算コードを用いると、船外（上空や側面）に放射性物質を含むプルームが存在する時の線量率の船内空間分布を推定することができる。これらを用いて、運航担当者以外の乗務員が万一の場合に避難する場所（部屋）を設定しておく。ここでは、内部被ばく防止の観点から、気密性の高い部屋が望ましい。

・事前に防護措置レベルを設定しておく。

船長はじめ船舶運航担当者は、放射線防護上は「公衆」と位置付けるべきであり、年限度1ミリシーベルト（または特殊な状況下での限度5ミリシーベルト）を適用する。これを担保するために、例えば、「警戒レベル」、「退避準備レベル」、「緊急避難レベル」を設定してき、船外モニターの指示値を参考に、適切な海域・港湾への退避等の防護措置を行う。

・内部被ばく対策をしておく。

プルームに覆われるという最悪のシナリオを想定すると、船舶全体に気密性を持たせることは不可能なので、上記退避スペースの確保に加えて、防護服や半面・前面マスクなどを準備しておくべきである。

また、汚染した場合に備えて除染設備も必要となる。重量、面積、強度、組立て容易性等の条件から、フレーム式除染テントが適切であると考えられる。

⑤適切な放射線測定器を選択し、それらをパッケージ化したものを国内複数個所（可能であれば出動候補船舶の係船地）に配備しておくことを提案する。

- ・必要最小限の放射線測定器を整備しておく。

用途に応じていくつかの種類測定器が必要となる。以下に一例を示す。

- 区域内線量率モニター：ポータブル型半導体式モニター（表示付）
- 可搬型線量率モニター（ γ 、 β 用）：GM管式サーベイメータ
- 汚染検査用：GM管式サーベイメータ（広口）
- 核種分析用：CeBr₃シンチレーション式検出器
- 個人被ばく線量計：半導体式（直読用及び時系列データ記録用）

- ・放射線防護対策用品もトランクケースにまとめておき、放射線測定器等と合わせて配備する。

以下に防護対策用品の一例をリストアップする。これらは、アルミニウム製トランクケース（容積：約70リットル）2箱に収まる。

- | | |
|--------------|-----|
| -防塵マスク | 20枚 |
| -マスク用フィルター | 20枚 |
| -サージカルマスク | 20枚 |
| -チオックス手袋 | 20枚 |
| -綿手袋 | 20枚 |
| -不織布製保護服 | 20着 |
| -養生シート | 1巻 |
| -大型ポリ袋（廃棄物用） | 30枚 |

⑥船舶（母船）が近づけない場合、放射線測定器及び通信装置を格納したドローン（小型飛翔体）や無線操縦式小型ボートの利用を提案する。

- ・ 小型放射線検出器、スティック PC、GPS 受信機、電源バッテリーを搭載したドローンによる放射線モニタリングは有効な手段の一つである。

ドローンの有効性については疑う余地はないが、いくつかの点に留意しておくべきである。

- 安定航行に不可欠なオートパイロット内のデータはメーカーに送信されるため、機種選定の際に考慮しておく
- ドローンの操作による放射線測定器への影響（ノイズ発生）
- 強風（約 8 m/s）での安定操縦が難しいこと
- 回収不能の事態を予測しておくべき
（線量率データはリアルタイムで送信、スペクトルデータは記録）

- ・ 小型ボートに小型放射線検出器、タブレット PC、GPS 受信機、電源バッテリーを搭載し、無線 LAN を経由して母船に放射線データを送信するシステムも有効な手段の一つである。

小型無人ボートは、廉価なホビー用から数千万円の模型船まで販売されている。ドローンに比べて航行速度は遅いが、ペイロードが大きいことと回収不能率が低いと言った利点がある。

全長 1.4m、重量 13kg の小型リモコンボートを用いた実海域での実験では、以下のことを確認した。

- 波高 0.5m でも問題なく自律航走できた
- 通信可能な距離（約 500m）ではリアルタイム測定が可能であった
- 一部モーターからと思われるノイズがあり、その対策が必要である
- このサイズでは数 100m 離れると、母船からの視認が難しくなる

実運用のためには、もう少し大きなサイズが必要である。

また、あらかじめコース設定が可能のため、平時の海域放射線モニタリングや汚染モニタリングへの利用も期待できる。

3.2 船舶への海上前線基地機能の付加

3.2.1 船外放射線モニターの設置と船内の放射線防護対策（H27～H29）

3.1 節で検討した船舶調達、マンニング及び法的支援が解決すれば、被ばくを避けながら船舶が発災したサイトに向かうことになるが、既に炉内状態悪化が進行して放射性物質の飛散が始まっている場合、或いはモニタリング中に炉内状態が急変して飛散が始まる万が一の可能性もある。船内の運航要員や業務従事者の被ばくを避けるためにも、船外に設置する放射線モニターの役割は重要である。船内（特に最上部にある船橋）には、当然、ポータブル線量率計を設置するが、早期の検出のためには、高感度船外モニターを設置し、その数値を監視しておくことが有効である。

本サブテーマにおいては、適切な船外放射線モニターを選択して練習船に設置し、実海域での動作確認を行うとともに、万が一の場合を想定して放射線防護対策を検討することを目的とした。

【H27～H28 年度】

まず、モンテカルロコード EGS5 を用いて、様々な形状の発生源（揮発性及び気体状核種を含んだプルーム）に対して、放射能濃度と船内外の線量率との関係を計算した。上空に放射性物質を含むプルームが一樣に存在すると仮定して、練習船上に設置した放射線モニターの位置（高さ）に対する吸収線量率の変化、つまり相対モニター読取値のモニター設置高さ依存性を計算した。この結果、プルームの高さが 20m から 45m 程度変化しても、線量率比はおよそ 0.5～0.6 付近でありあまり変化しないことが分かった。つまり、船外に設置したエリアモニターの数値を見ておけば、おおよその船橋内の線量率が予測できることになる。なお、通常の原子力発電所や研究機関放射線実験施設で使われているモニターとしては、高圧電離箱式と NaI（ヨウ化ナトリウム）シンチレーション式とがあり、線量値の正確性では前者が、感度的には後者が優れていることが知られている。上記線量率比の値から、船外モニターとしては感度を優先すべき（後者を選択すべき）であるという結論を得た。

次に、船舶に搭載する NaI シンチレーション式のモニタリングポストを調査したところ、本体、計測部及び接続ケーブル等の改造及び仕様変更への対応可能性の観点から、応用光研工業社製の船舶用モニタリングポスト FND-303 が最も適していると判断した。同機は結晶サイズが 2 インチの温度補償型 NaI シンチレータであり、1 分毎の線量率に加えて 10 分毎のスペクトルデータが得られる。

図 3-12 に神戸大学所有の練習船「深江丸」に取り付けた船舶用モニタリングポストの写真を示す。



図 3-12 船舶用モニタリングポスト検出部

モニタリングポストの設置場所については、検出感度の観点から、できる限り高い位置に設置すべきであるが、取り付け作業のしやすさ、安定性等の条件を加える必要がある。深江丸の場合では、コンパスデッキのさらに上、マストに取り付けることが感度の観点から最も適した場所ではあるが、マストには回転するレーダーがあるため設置可能なスペースが狭く難しいため、船外モニターはコンパスデッキに設置することとした。

なお、計測部（図 3-13）は実験室に設置し、検出部とは測定データ通信用と温度を調整するヒーター用のケーブルで繋がれており、船舶運航中に海水がかかっても運用に問題がないように防水保護した。



図 3-13 船舶用モニタリングポスト計測部

【H29 年度】

(1) 船外モニターの動作確認

平成 29 年 10 月 5～6 日にかけて実施した神戸大学所有練習船「深江丸」での和歌山県御坊市沖までの航海実験において、実際に船外放射線モニターを運用してみた。平成 29 年 10 月 5 日 6 時半から 6 日 16 時までのモニタリング指示値の時間変化を図 3-14 に示す。

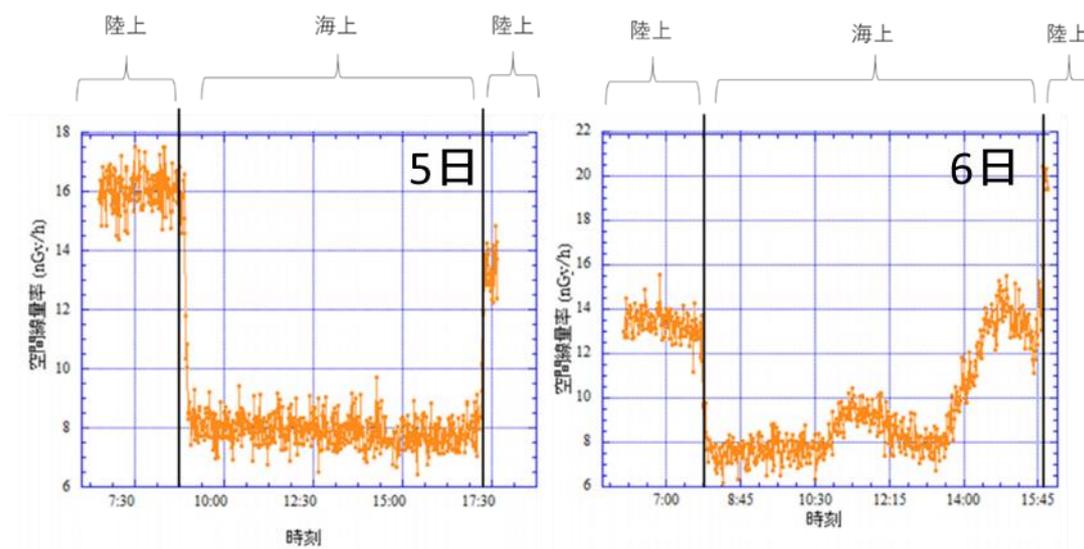


図 3-14 深江丸実験における線量率の時間変化

図 3-14 の左図は御坊沖へ向かう 1 分ごとの線量率をグラフにしたものであり、右図は復路の結果である。自然放射線は、宇宙線、大地放射線及び大気中ラドンが大半であるが、海上では大地に含まれる放射性物質に起因する後の 2 者が少ないため、陸地から遠ざかると図の中央部のように数値が低くなっている。このように設置した船外モニターは正常に作動したことが確認できた。

(2) 除染用テント

本サブテーマにおけるもうひとつの課題として、放射線実験施設における管理区域や除染設備など、船舶を放射線施設とみなした場合の処理用実験室の検討を挙げている。当初は、コンテナを含む簡易ラボを候補にしていたが、重量が非常に大きく練習船への設置は現実的ではないと判断した。平成 27 年度に行った敦賀市消防局との意見交換において教えて頂いた除染用テントについて情報を収集し、簡易ラボとの比較を行った結果、固定方法や注水方法、重量、設置方法・時間、使用後の処分等の観点から、本事業で想定している機能としては、除染用テントの方が適していると判断した。

最悪のシナリオ、即ち、放射性プルームに覆われてしまった場合には、飛散してきた放射性物質に汚染されることが想定されることから、要員が船内に戻る際にスクリーニングを行い、汚染がある場合に除染する必要がある。除染は甲板から船内に入る前に行うこととなり、船内への入口付近に設置する除染テントの中で行うことを考え、除染テントの設置と運用について検討を行った。現在、NBCR 対策（N：核、B：生物、C：化学、R：放射能）のために市販されている可搬型の除染テントには、空気を入れることによってテントが展張するランコ式除染テントと、テントをフレームで支えるフレーム式除染テントがある。いずれの方式のテントも、放射性物質を除染するためのシャワーや、除染した体に放射性物質が再度付着するのを防ぐためのスノコ等、除染に必要な設備が付属されている。それぞれの方式の除染テントについて、その特徴と、今回の使用目的を考えたときの利点と課題について整理、検討を行った。



図 3-15 ランコ式除染テントの外観と内観

図 3-15 に示すようなランコ式除染テントの利点としては、ボンベやポンプを用いて空気を注入することによりテントが展張し、自立するため、設置が容易である点がある。そこで、神戸大学と放射線災害時の協力協定を締結している神戸市消防局に依頼して、同局が所有しているランコ式除染テント（帝国繊維（株）ARZ-23）の実地調査を行った（図 3-16、平成 29 年 8 月 9 日）。テント本体は 60kg の重量があるものの、2 人で運搬・設置でき、ボンベで空気を注入し始めてから自立するまでに要する時間は 80 秒弱と短時間であった。また収納時は本体がコンパクトにまとめられるので、狭い船内でも邪魔にならない点もメリットと考えられた。一方で、かなりの面積を必要とするため、船上の甲板で設置するための場所の確保が問題となることが分かった。市販のランコ式の除染テントで最も小さいものは底面が 2メートル四方で、空気を注入するためのボンベやポンプの設置場所も合わせて考えると、本研究で使用する練習船の深江丸、大島丸に設置するのは難しい。なお、高価（一式約 400 万円）であることも、体制を構築していく上でも考慮しておく必要がある。



図 3-16 神戸市消防局特殊災害隊所有のランコ式除染テント

一方、フレーム式除染テント（図 3-17）の利点としては資材が単純で安価な点が挙げられる。しかし、フレームが長くなってしまったため、保管場所の確保や設置に手間がかかる課題がある。特にフレームが折りたたみ構造になっている場合は、組み立てに設置面積よりかなり広い面積が必要となり、ランコ式に比べて設置に必要な人員も多くなる。

上記の検討結果から、船上甲板で除染テントを設置・運用するうえで、設置面積、設置の手間、コストを考慮し、プロジェクト研究として図 3-18 に示すような小さなフレーム式の除染テント（（株）ノルメカエイシア



図 3-17 神戸市消防局特殊災害隊所有のフレーム式除染テント

HM1001C) を購入して検証した。展開時寸法は 107cm x 91cm x 203cm でひとりずつしか除染できないが、船上甲板で容易に設置できる。また、収納時寸法は 205cm x 40cm x 55cm で、折りたたみ式ではないが、船内に保管場所も容易に確保できることを確認した。



図 3-18 フレーム式除染テント HM1001C

市販されている NBCR 対策の除染テントは陸上（都市や野外）に設置されることを前提に設計されている。洋上では風が強く吹く場合が多く、気流の方向も不安定でめまぐるしく変わることも想定しなければならない。現在市販されている除染テントは取り回しや運搬のため、軽い素材で作られている。実際に深江丸船上に置いて運用した結果、洋上の風が強く気流の変化の多い環境では、除染テントが飛ばされないよう、別途、船舶にしっかり固定する方が必要であることが分かった。また、汚染状況を作り出すことは困難なため、実際には深江丸の甲板上に除染テントを設置し、陸上の除染シャワー室と同様の機能を有していることを確認した。

(3) 防護対策レベルの設定

本プロジェクトでは、船舶乗組員が有意の被ばくをしないように放射線モニタリングを行うが、このような状況を想定した被ばく防止に関する法令はない。そこで、いくつかの放射線関連法令や防護指針を参考にして、あらかじめ乗組員／作業員の線量管理目標値を設定しておき、何らかの防護措置とそれを運用するかかの判断に重要な放射線モニター指示値を決めておく必要がある。

表 3-2 は放射線関連法令を関係官庁ごとにまとめたものである。

表 3-2 放射線関連法令

関係官庁	法令
環境省 (原子力規制委員会)	原子力基本法
	放射線同位体元素等による放射線障害の防止に関する法律(障害防止法)
	核原料物質・核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(炉規法)
厚生労働省	労働基準法 労働安全衛生法(電離則)
	医療法(医療法施行規則)
	薬事法(薬事法施行規則)
国土交通省	船員法(船員電離則)
人事院	国家公務員法(人事院規則一〇一五)

「放射線同位体元素等による放射線障害の防止に関する法律(障害防止法)」の目的は、「原子力基本法」の精神にのっとり、放射性同位元素の使用、販売、賃貸、排気その他の取り扱い、放射線発生装置の使用及び放射性同位元素又は放射線発生装置から発生した放射線によって汚染された物(以下「放射性汚染物」という。)の廃棄その他の取り扱いを規制することにより、これらによる放射線障害を防止し、公共の安全を確保する」こととしている。つまり、障害防止法は、事業所で働く作業員や事業所周辺の一般公衆に対する安全を確保するための法律である。

「電離放射線障害防止規則(電離則)」は、労働安全衛生法及び労働安全衛生法施行令の規定に基づいて定められている。福島事故を受けて、東日本大震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則(除染電離則)が定められた。労働安全衛生法の目的は、労働基準法と相まって、労働災害の防止のための危害防止基準の確立、責任体制の明確化及び自主的活動の促進の措置を講ずる等その防止に関する総合的計画的な対策を推進することにより職場における労働者の安全と健康を確保するとともに、快適な職場環境の形成を促進することとしている。つまり、電離則は事業所外の労働者も含めたすべての労働者に対する法律であるといえる。ただし、船員と国家公務員は除かれており、それぞれ船員法と国家公務員法において規制されている。

「船員電離放射線障害防止規則(船員電離則)」は、船員法に基づき定められたものであり、船員の電離放射線による障害防止を目的とした法律である。船員電離則では、放射線業務従事者と一般船員の線量限度が定められている。他の法律・規則が「放射線業務従事者」に対する線量限度(100 mSv/5年)をのみを定めているのに対し、この規則では、公衆の線量限度(1 mSv/年)が一般船員に適用されている。

各法律の線量限度を対象者としてまとめると、表 3-3 のようになる。

表 3-3 放射線関連法令とその対象者及び実効線量限度

法律	対象者	放射線業務従事者の線量限度
障害防止法	作業従事者	実効線量：100 mSv/5年,50 mSv/年 女子は 5 mSv/3月 眼の等価線量：150 mSv 皮膚の等価線量：500 mSv 妊娠中の女子：使用者等が妊娠の事実を知った時から出産までの間につき、内部被ばくについて 1 mSv
炉規法	作業従事者	
労働安全衛生法（電離則）	労働者（船員、国家公務員は除く）	
医療法	医師、歯科医師、薬剤師、看護師及び医療を受ける者	
船員法 [※]	船員	
国家公務員法	国家公務員	

※船員法において、一般船員（放射線業務従事者以外の船員）については実効線量:1 mSv/年、眼の等価線量：15 mSv/年、皮膚の等価線量：50 mSv/年としている。これは、一般公衆に対する基準を適用しており、記載されているのは「船員法」のみである。

このように、放射線業務従事者に対する線量限度は斉一化が図られている。現在の法律では、放射線業務従事者に対する線量限度を定めており、放射線業務従事者の被ばくは職業被ばくとなり、一般公衆に対する線量限度は公衆被ばくとして定められている。一般公衆に対する線量限度は直接の記述はなく、国際放射線防護委員会（ICRP）によって 1 mSv/年と定められている。ただし、障害防止法において工場又は事業所の境界及び工場又は事業所内の人が居住する区域では、250 μSv/3月と定められており、これは 1 mSv/年を考慮したものであると考えられる。

次に、本事業で想定している海上での放射線モニタリング作業を「緊急作業」として扱うべきなのかについて検討を行った。平成 26 年度までの放射線審議会での審議を経て、福島原発事故の災害を受け、原子力災害の拡大を防止するため、緊急時における放射線業務従事者の線量限度を変更している。原子力災害対策特別措置法の原子力緊急事態宣言がなされた日から、解除宣言がなされた日までの間の緊急事態応急対策実施区域において、特にやむを得ない緊急の場合は、実効線量について 100 mSv を 250 mSv とし、既に施行されている。

ただし、本事業で想定している業務では、放射線モニタリングが主な作業となるため、除染電離則は適用できない。また、障害防止法における定義でも、該当する項目がないことから、モニタリングは緊急作業に含まれないと考えられる。しかし、モニタリング中に予期しない事態となり、避難しないといけない場合は、電離則における「健康障害を防止するための応急の作業」や、障害防止法における「放射性同位元素による汚染が生じた場合には、速やかに、その広がり防止及び除去を行うこと」とみなすことも可能であると考えられる。従って、船舶を退避させる際には、被ばくの拡大を防ぐ作業とみなし、被ばく限度の上限を上げることが可能であろう。

以上の検討から、本プロジェクトの放射線モニタリング作業時の線量限度の基準値は、原則、一般公衆の線量限度である 1 mSv/年と扱うべきであると結論できる。万が一、プルームが接近してきた時などの船舶の緊急避難が必要となった場合には、緊急作業として、基準値を 100 mSv と扱うべきと考えることができる。

3.2.2 高線量率や高放射能濃度環境対策としての船内線量計算と遮蔽補強 (H27~H29)

本サブテーマでは、船舶があらかじめ設定したレベルを超える高線量率・高放射能濃度の状況に置かれてしまうという状況を想定し、有効な放射線防護対策を検討することを目的とした。発災した原子力発電所に接近し、海上からモニタリングを行う際に、どれほどサイトに接近できるかは、原子炉の状態（放射性物質の放出率）だけでなく、その時の気候や風向きなどによって大きく変化する。そこで、揮発性及び気体状核種が船舶の上空や側面に存在すると仮定して、EGS5 コードを用いたモンテカルロ計算によって船内の線量分布を推定し、被ばく低減のための避難スペースの確保及び遮蔽体の補強等の対策を検討した。

【H27~H28 年度】

まず、神戸大学が所有する練習船「深江丸」を想定し、計算時間短縮のために5層に分けた単純な体系とした。1層目はコンパスデッキで、船外モニターを設置している場所である。2層目は船橋（ブリッジ）で、船長や航海士が操舵するスペースである。船長を含めた一定人数は、有事の場合でも操舵のため避難することができないため、ここでの線量率の把握は被ばく管理の点から最も重要である。5層目は機関室や居室や下甲板を含んでおり、水面下にある。船舶の外側と各層の境界は、壁は鉄 0.9 cm、窓は二酸化ケイ素 0.9cm、床は鉄 0.9 cm にセメント（O、Si、Ca、Fe の混合物）5.7 cm を重ねたものとした。

次に、原発事故で放出される放射性核種のうち、放出量が多く、また人体に対する被ばく影響を考える上で重要であるという観点から、I-131、Cs-134、及び、Cs-137 の3核種を選んだ。放射性核種はある大きさの塊（プルーム）で、本来は雲のような複雑な形であると予想されるが、計算の単純さから一定の放射能密度の直方体構造と仮定し、ガンマ線を一様かつ等方的に放出させた。これらガンマ線が船舶に降り注ぎ、船内構造物等と相互作用しながら輸送され各層でエネルギーを付与する。線源の形状、線源の高さ、及び側面に存在する場合の船舶からの距離をパラメータとして、船内各層内の平均吸収エネルギーを計算した。これら結果を、プルーム中に含まれる全放射能[Bq]当たりの各層における平均吸収線量率 [μ Gy/h]として整理した。このことから、プルーム中放射能と船内の吸収線量率との関係を定量的に求めることができた。なお、鉛遮へい体による線量低減を検討したが、数 mm 以上必要であり、船舶全体あるいは壁面に重量物を置くことは現実的ではないと判断した。

また、船舶がプルームに覆われるという最悪のケースを想定して、内部被ばくについて検討した。放射能濃度、呼吸量及び実効線量係数から預託実効線量を計算した結果、内部被ばく（預託実効線量）と外部被ばく（1cm 線量当量）を比較すると、内部被ばくが Cs-137 で約 1000 倍、Cs-134 で約 600 倍、I-131 で約 2600 倍であることが分かった。

【H29 年度】

(1) 線量計算の精密化

前年度までの3核種（Cs-134、Cs-137、I-131）に対する計算に加えて、希ガスの代表例として Xe-133 の影響を調べた。大気中の希ガスの濃度分布については不明な点が多いが、計算の都合上、一定の大きさの気団に含まれると仮定して計算した。船外放射能濃度と船内

線量分布の関係を、上空に存在する線源の高さ及び側面に存在する場合の距離を変化させて計算した。それら結果を図 3-19 に示す。Xe-133 は $(0.4\sim 0.8)\times 10^{-10}$ [$\mu\text{Gy}/\text{h}/\text{Bq}$]程度となり、他の3核種の $(2\sim 18)\times 10^{-10}$ [$\mu\text{Gy}/\text{h}/\text{Bq}$]と比べると約1桁低い値になっている。これは、ガンマ線放出割合が低いことと、放出されるガンマ線のエネルギーが低いので減弱が大きいためだと考えられる。

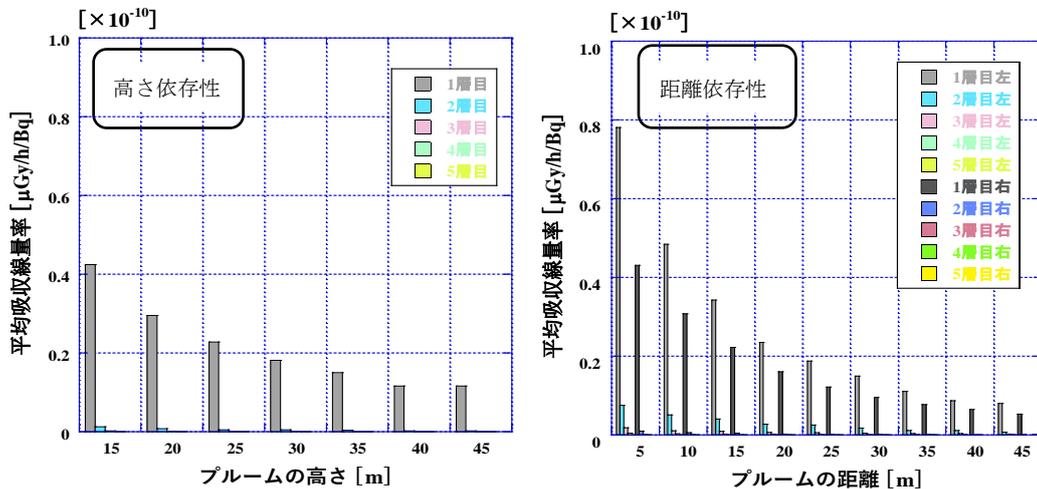


図 3-19 Xe-133 線源の高さ及び距離に対する線量率の変化

次に、体系の分割数を増やして、層内での変化の度合いを確認することにした。しかし、EGS5 では計算時間がかかってしまったため、比較的小さな領域の線量分布計算に適した別の計算コード PHITS を用いて体系を精細化し計算を行うこととした。なお、2つのコードの整合性は単純な体系での計算によって確認している。船舶の中で被ばく管理の観点から最も重要である船橋（ブリッジ）を仮定し、図 3-20 のように、ブリッジを一辺が 0.5 m の立方体の塊になるように横を 24、縦を 16、高さを 5 分割した。床、壁、窓の構造については、前節と同じとした。

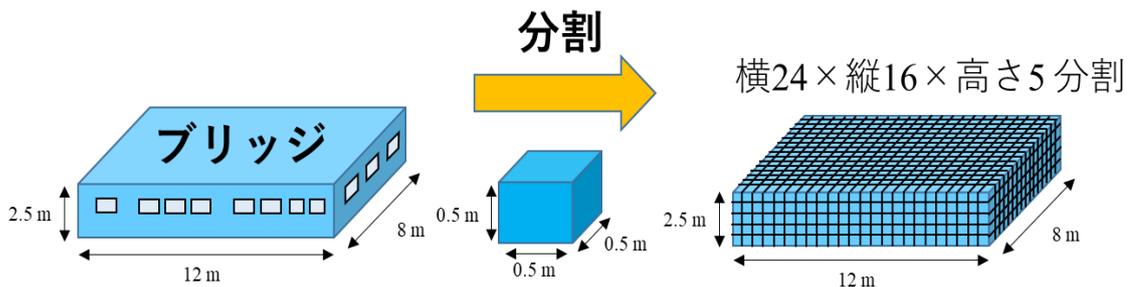


図 3-20 ブリッジを精細化した計算体系

核種は Cs-137、Cs-134、I-131 の 3 つとし、図 3-21 に示すように、プルームの形状は一定とし、そのプルームの高さ（ブリッジの上面から）を 2.5 m、27.5 m、52.5 m の 3 点で計算した。

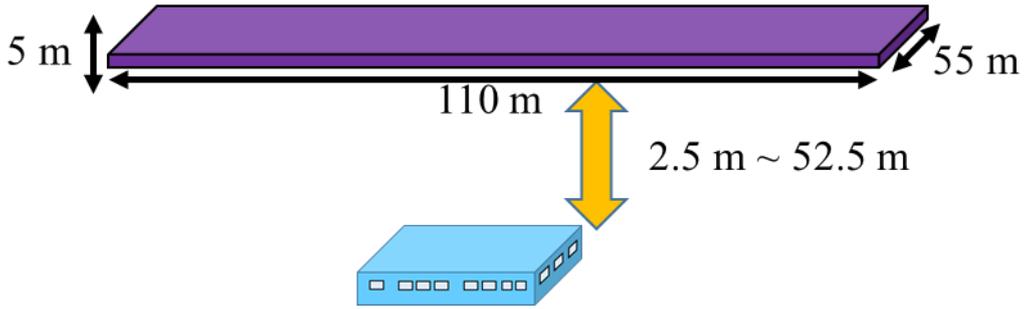


図 3-21 PHITS 計算における体系（線源の大きさ高さ）

計算結果を図 3-22 及び図 3-23 に示す。前者は全長 23 m のブリッジの横方向の平均吸収線量率の変化を、後者は高さ方向の変化（1 層目が一番上である）を計算した結果である。

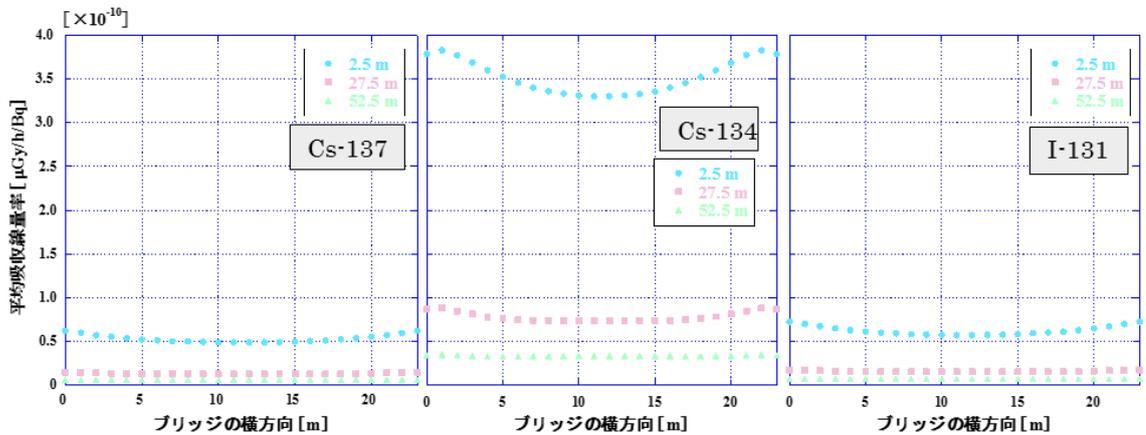


図 3-22 ブリッジ内線量率の空間分布（横方向に対する変化）

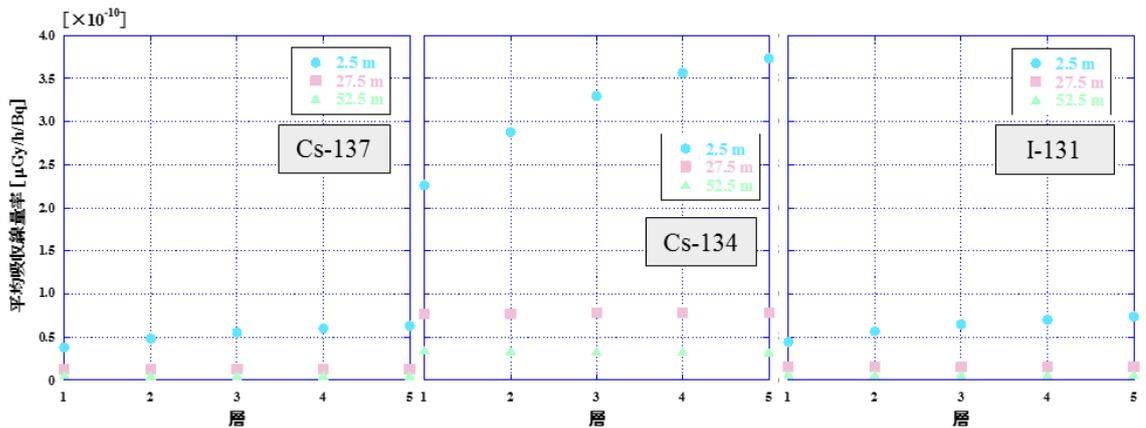


図 3-23 ブリッジ内線量率の空間分布（高さ方向に対する変化）

この結果から、3 核種とも共通してブルームの高さが高くなるにつれて線量率の値は減少しており、これは EGS5 での計算結果と一致していることが確認できた。空間分布をみると、ブリッジの両壁の線量率が少し高い値となっており、これは散乱線の影響であると考えられる。高さ方向に対する変化については、ブルームの高さが 2.5 m では、ブリッジの 5 層目、つまり、一番低い位置での線量率が最も高く、1 層目の線量率が低くなっているが、この増

加傾向はプルームの位置が高くなると見られなくなることがわかる。

ブリッジ内の各領域における線量率の全体の平均値からの誤差（最大と最小）を表 3-4 に示す。このように、ブリッジ内での線量率のばらつきは、大きくても 8.3%であったことから、単純な（粗い）体系で計算しておけば約 10%以内の精度で評価できることを確認した。

表 3-4 3 核種に対する線量率分布の平均値からの誤差

	平均値からの誤差
Cs-137	+8.3% -5.9%
Cs-134	+5.8% -4.2%
I-131	+8.2% -5.9%

(2) 内部被ばく対策について

昨年度までの計算結果から、内部被ばくと外部被ばくの影響を比較すると、前者は後者の約千倍の影響があることが分かった。つまり、プルームに覆われた場合には、内部被ばくが支配的となるため、緊急時に船橋に残る運航要員にはその対策が必要である。内部被ばくの対策として有効な方法として、施設内の空気を遮断する方法や、施設を正圧に保つ方法があるが、既存船舶に大きな改造を施すことは難しい。そこで、被ばく対策としては、緊急措置として半面・全面マスク、防護服の着用が必要になる。また空調システムについては、ある程度の対策を施すことが可能である。

平成 29 年 10 月の深江丸での実験航海において、半面・全面マスク、防護服の着用や船舶の空調システムの防護対策の検証を行った。図 3-24 は、実際に防護服とマスクを着用した状態で、養生された通路を通過する様子である。防護服の着用では、袖口などをテープで貼り付けるため 10 分ほどかかるが、十分に被ばく対策として有効であることを確認した。



図 3-24 防護服及びマスクの着用と船内の養生

また、事故発生時には放射性物質が船内に充満しないように HEPA フィルターやチャコールフィルターなどの高い粒子捕集率を持つエアフィルターを取り付けることを考える必要が

ある。汚染状況を作り出すことは困難なため、実際には深江丸航海実験において、図 3-25 に示すように、通風口にハイパックプレフィルター（集塵捕集効率 82%）を取り付け、船舶の空調機を運転し、正常に作動することを確認した。あらかじめ（出航準備段階で）通風口のサイズにカットしておくことで、速やかに取り付けることができ、緊急時の乗船員の被ばく低減に有効であると考えられる。



図 3-25 深江丸の船内及び船外の通風口

3. 2. 3 通信基地としての機能も有する船橋の設計（H27～H29）

船舶に設置する放射線測定器及び無人小型ボートやドローンに搭載する測定器のデータは、一旦船舶に送信し、ここから船舶独自の通信を用いて衛星通信を通して地上にデータを送る構成を計画している。そこで、本サブテーマでは、通信機器の選定やデータ量・通信速度等の通信システム全体を設計することを目的とした。また、通常の運航統括機能に加えて、船橋に通信基地としての機能を持たせるためのスペースの確保等の検討を行った。

【H27～H28 年度】

具体的には、以下の 3 点を中心に検討と実験を行った。

- (i) 海上におけるデータ通信についての検討
- (ii) デジタル簡易無線のデータ通信モジュール実験
- (iii) 小型 PC の検証

(i) 海上におけるデータ通信についての検討

船舶によるデータ収集等を行い、陸上にデータを転送するには、何らかのデータ通信回線を利用する必要がある。そこで、まず現状で利用可能な回線・機器（8 種類）を調べ、使用可能範囲（距離）、回線速度及び回線費用を比較した。陸上におけるデータ通信の状況に比べて、海上の船舶と陸上の間でデータ通信を行うには、低速である上、通信料金が非常に高価であることが分かった。

このような状況から判断すると、国内における原子力発電所での事故を想定した場合、ドコモ・モバイルのデータ通信（船舶電話）か携帯電話の回線（3G, 4G, LTE）が合理的であるという結論に至った。

(ii) デジタル簡易無線のデータ通信モジュールの実験

実際にデータ通信を実現し、海上において遠隔での計測データ転送や観測のための小型舟艇の遠隔操作等に利用できるかどうか検証するため、製品（モジュールとアンテナそれぞれ 2 組）を購入しその使用方法を調査した。このモジュール（日本無線製 NTF-431A(N)）は、簡易無線局の免許局として免許申請可能なデータ伝送用のデジタル簡易無線モジュールである。空中線電力は 1W であり、郊外で約 1km の長距離通信を無線区間 4800bit/秒の通信速度で実現することができる。これとパソコン及びその他端末を外部機器接続（RS-232C）インターフェースで接続し、データを通信する。このモジュールは、制御コマンドにより接続を開始し、データ伝送モードに移行したのち、データを送受信し、最後に接続を終了する。基本的な動作確認は終了したが、深江丸に装備するためには、単純なデータ転送ではないため改良が必要であることが分かった。そこで、図 3-26 のように、作業船で計測したデータを母船まで転送し、さらに母船から陸上に転送する方式とした。母船と陸上の間は、主に陸岸からの距離の問題を考慮し、通信可能な回線を選択して用いる。この枠組みで、母船と作業船間の通信実験として、深江丸船橋と小艇にデジタル簡易無線のデータ通信装置を仮設し、通信実験で動作を確認した。

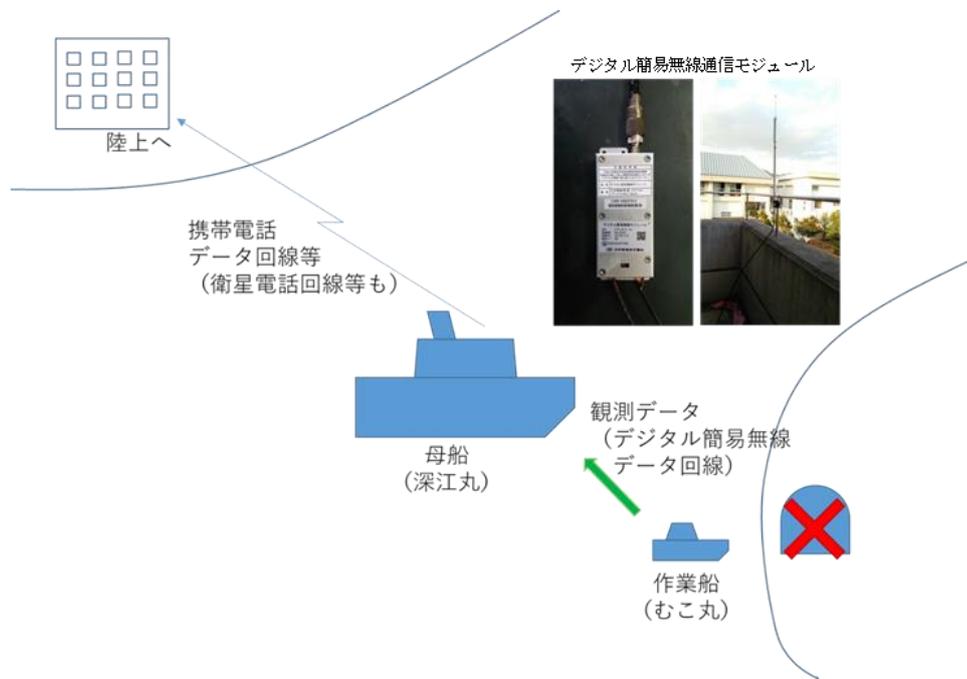


図 3-26 海上での計測データ（小型船舶等）の陸上への転送手段

(iii) 小型 PC の検討（データ収集記録、制御用）

データの収集や記録、通信、機器（小型舟艇を含む）の制御には PC が必要となる。例えば遠隔で小型の飛行体（ドローンやヘリコプター）や小型舟艇への装備を想定すると PC の大きさ、重量等、十分に小さい必要がある。そのような使用で十分な性能を確保するための検討を行った。

計測機器やデータ通信に使用するため、超小型 PC の検証を行った。Raspberry Pi 2 B (図 3-27 参照) を入手して。OS に Raspbian をインストールし、放射線データとの集約化のためシリアル信号 (RS-232C レベル) へのコネクタを増設する等の加工を行い、動作実験を行った。Raspbian は Linux 系の OS であり、これまで開発したソフトウェアも容易に移植できることが確かめられた。ただし、5V (USB と同等) 電源が必要である。



図 3-27 RS-232C 変換基板とコネクタを取り付けた Raspberry Pi 2 B

次に、小型化のための方策のひとつとして、Windows タブレットについて検討した。近年、10 インチ以下のタッチパネルを備えたタブレットが市販され、キーボードやマウスを接続することなく本体のみで動作および操作可能なので小型 (画面サイズ + 1 cm 程度以内の厚み) で重量も 500g 以内で運用可能なものもある。また、WiFi の機能も内蔵されており、外部機器を使用せずに LTE 等の SIM カードを内蔵して携帯電話のデータ回線を利用できる機種もあるので、場面に応じて利用の可能性があると考えられる。電源については、多くの機種が 5V (USB と同等) で供給・充電するが、バッテリーを内蔵しているので、バッテリー駆動であれば 10 時間程度の動作が可能である。

上記の超小型 PC、Windows タブレットや WiFi 機器など、使用を想定する機器類は 5V (USB と同等) の電源を使用するものが多い。通常の AC100~220V 商用電源が利用可能な状況では AC アダプタを使用して電源供給することが可能であるが、小型飛行体や舟艇等では、商用電源が利用できないことも想定しておく必要がある。

以上述べたように、最新の通信機器について調査・検討した結果、通信機器は当初の予想に比べて大幅に小型化できることが分かり、船橋内の設置スペース上の問題はないことが明らかになった。運用方法としては海岸からおおむね 10 km までは携帯回線を使用、海岸からおおむね 10 km 以上は衛星回線を使用することがよいと結論づけた。

【H29 年度】

最終年度である平成 29 年 10 月に実施した航海実験では、神戸大学深江キャンパスから、和歌山県御坊市の想定地点まで約 59 海里で、計画では 09:00 神戸港出港、14:15 日高新港沖の想定地点に到着となっていたが、実際には、08:52 発、現場には 14:23 に到着した。そ

の航路（青色の線）を図 3-28 に示す。

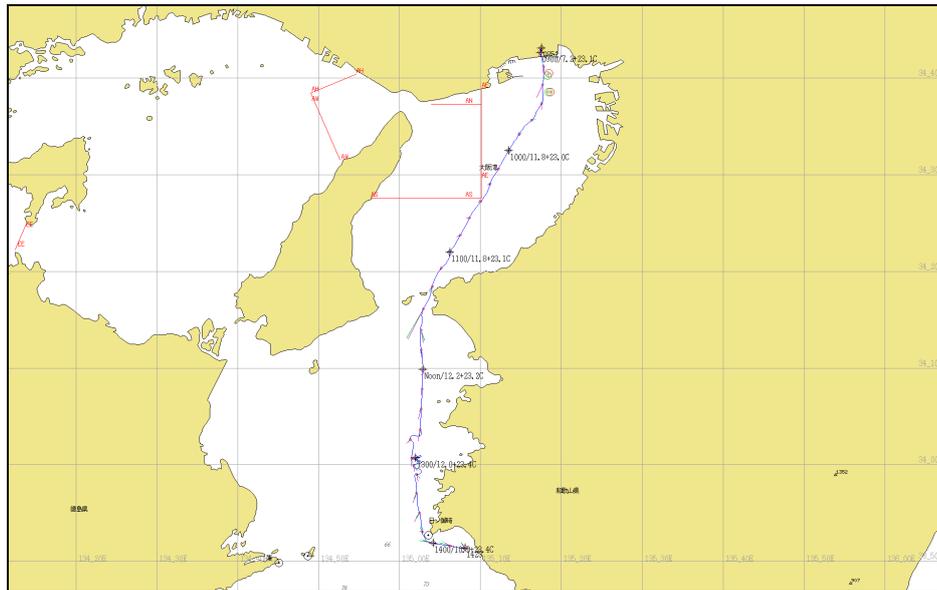


図 3-28 深江丸実験の航路

昨年度までの数回にわたる近海での運用実験において、設計したデータ通信方式が正常に作動することを確認している。今回の実証実験においては大阪湾を航行するため、主として携帯回線によるデータ通信の実験を実施した。海岸から近距離であったため十分な速度で通信できることを確認するとともに、放射線データと深江丸航行中の GPS データを同時に取得し、地図上に各地点における線量率を表示させた。（図 3-29）。

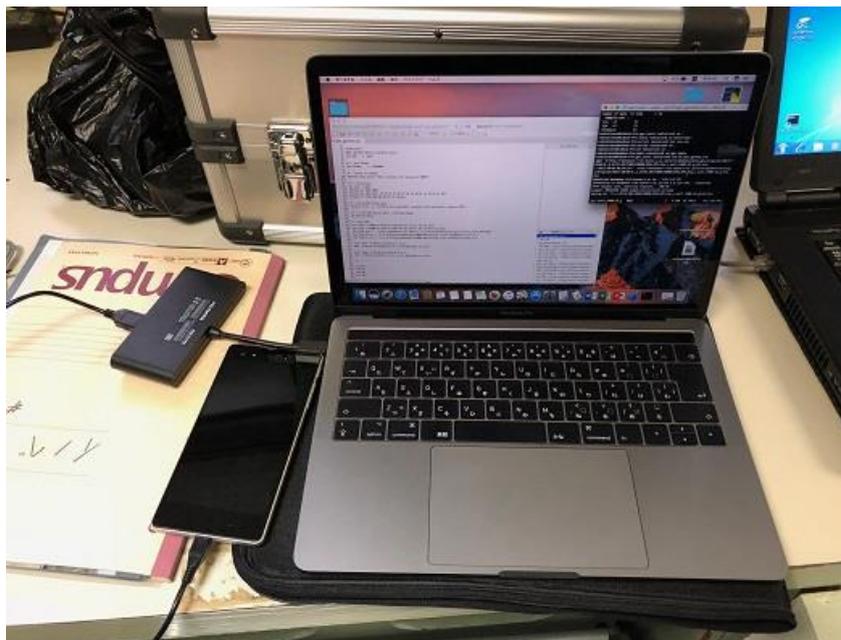


図 3-29 携帯電話回線による航海中のデータ通信実験

なお、携帯回線以外の放射線測定データを船舶から陸上に転送するために必要な通信手段について昨年度に引き続いて検討し、通信回線使用料と通信性能との観点を更新したものを表 3-5 に示す。本システムには、表中(5)および(6)が適していると判断し、上述のように、本実験では、より安価な(6)を採用した。

表 3-5 海上における陸上とのデータ通信の選択肢

	回線・機器の種類	使用可能範囲	回線速度	通信費用	備考
(1)	Inmarsat FBのデータ通信	全地球規模	低速 (32～256kbps程度)	高価(基本料金+従量) 参考：基本料金71,200～808,900円/月 +従量4,860～29円/MB	
(2)	イリジウムデータ通信	ほぼ全世界(海上)	低速 (32kbps, 64kbps, 128kbps)	高価(基本料金+従量) 参考：基本料金9,600～418,000円/月 +従量1,750円～130円/MB	通信速度により通信料が変わる
(3)	KDDI Optima Marineサービス(非インマルサット静止衛星でKuバンドを使用)	主要な大陸及び海域(順次拡大予定)	低速 (16～64kbps)	高価 (通信料に関わらず定額) 参考：310,000～450,000円/月	通信速度により定額通信料が変わる
(4)	衛星携帯電話のデータ通信(ソフトバンク)	アジア ヨーロッパ	低速 (下り最大60kbps/ 上り最大15kbps)	基本料金：4,900円/月+従量2,000円/MB	
(5)	ドコモ・モバイルのデータ通信(船舶電話)	日本全土+沿岸200海里程度	低速 (144kbps 上り)	比較的高価 参考：月10,000円～64,000円 +パケット従量	日本近海船舶電話のデジタルデータ回線
(6)	携帯電話の回線を利用(3G, 4G, LTEなど)	沿岸のみ(陸から10～20km程度)	高速 (陸上と同等だが、一般に海上では通信速度が落ちる)	比較的安価 参考：月6,000円程度の定額が一般的	スマートフォンのテザリング機能やWi-Fiルータを用いてデータ通信をする
(7)	デジタル簡易無線のデータ通信機能を利用	1～2 km程度	低速 (9.6kbps程度)	機器代(回線使用料は不要) +免許関係(免許手続き、電波利用料が必要)	機器：1台25万円程度
(8)	無線LAN機器(Wi-Fi)を利用	数10m以内	高速 (11～450Mbps程度) *距離による	機器代のみ	機器：1台1万円程度

なお、通信費用等については、本稿の執筆時点で各公表のデータを調べたものであり、変更の可能性がある。

3.3 海上移動型モニタリングシステムの開発

3.3.1 船舶に搭載する放射線モニタリング装置のパッケージ化 (H27~H29)

放射線モニタリングを行う海上前線基地として最低限必要な放射線測定器一式を選定し、最終的にはそれらをパッケージ化することを本サブテーマの目的とした。このために考慮しておくべき点として、必要な放射線測定性能を有していることだけでなく、空間的な制約がある船舶内に設置または持ち込むので容積が小さいこと、揺動に耐えること（正常に動作すること）、パッケージ化に適していること、等の船舶搭載のための条件が付加される。

【H27~H28 年度】

陸上の管理区域に配備される放射線測定器を海上移動型モニタリングシステムに適用してみると、まず、船外の放射線レベルを最初に検知するための高感度船外モニターが必要であり、これについては、3.2.1 節において検討済みである。次に、船内における空間線量率を測定するためのエリアモニターが必要である。陸上では、据置きモニターを設置しておくのが普通であるが、平時には無用となる船舶には、取り外しが容易なポータブル型半導体式モニター（大型デジタル表示付き）が適していると判断した。

予期せぬ船内の汚染や、船外活動に伴う作業着の汚染、或いは小型ボートやドローンを使用した場合の汚染の有無の確認のためには、ベータ線を検出できる広口 GM サーベイメータが不可欠である。汚染が検出された時には、次段階として放射性核種の同定が必要となり、ガンマ線のエネルギー分析が可能な測定器を備えておくことになる。この用途に最も適している測定器は Ge（ゲルマニウム）半導体検出器であるが、動作時（高電圧印加時）に半導体素子を冷却しなければならないので、30 リットル程度のデュワーと液体窒素の調達が必要であることから、船舶搭載は不適だと判断した。ペルチェ素子を用いた電子冷却式 Ge 検出器が候補となるものの、冷却能力の都合上素子は小型にせざるを得ず、価格とともに感度上の問題が残されている。もし核種がある程度絞られているならば、分解能より感度を優先することもあり、最終的に CeBr₃（臭化セリウム）シンチレーション検出器を選択した。船外モニターで環境放射線より高いレベルが検出された場合にも核種同定を行う必要があり、核種分析用検出器については EMF ジャパン社製 EMF211 型（図 3-30）を選定した。

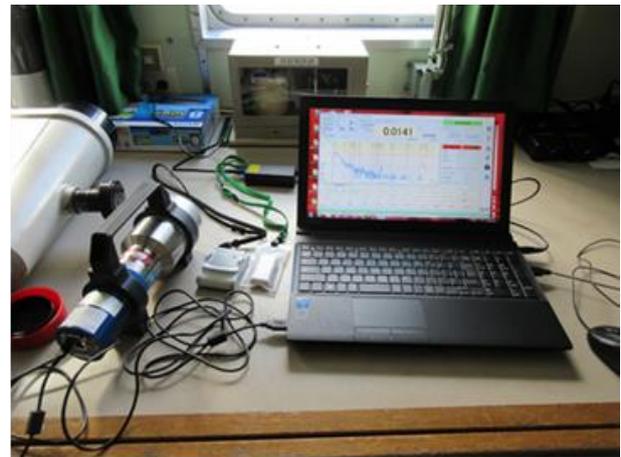


図 3-30 CeBr₃ シンチレーション検出器
(深江丸船内)

個人被ばく線量計については、放射線作業中に線量値を確認できる直読式と、一定期間（通常は1ヶ月）装着した後に専用のリーダー等で積算線量を読み取る積算型とに分類される。本事業で想定される期間は短期間の使用であることと、期間中に監視できる（読み取れる）ことから、Si 半導体素子をベースとしたポケット線量計が適していることが分かる。日立アロカメディカル社製 PDM-501 を選定した。0.01 μ Sv から積算値の測定が可能であり、

設定値になると音・光・振動で知らせることが可能である。単 4 形アルカリ乾電池 1 本で連続約 800 時間の使用が可能であり、内部的に一定時間間隔の時系列データを保存することが可能である。さらに小型の半導体式線量計に長期間の記録機能を持たせた線量測定サービス D - シャトル（千代田テクノロ社）も候補として選定した。この機種は、バッテリーを交換せずに 1 年間の線量値を記録し、かつ、1 ヶ月毎、1 日毎、1 時間毎のトレンドも読み取ることができる。

【H29 年度】

放射線モニタリング装置は即座に船舶に積み込めるように準備しておくことが重要である。そこで、いくつかの候補の中から、保管や輸送に優れたフジコーワ工業社製のアルミトランクケースを採用した。本製品は災害救助活動機材収納箱として陸上自衛隊等で採用された実績がある。蓋にはパッキンが装着されており、環境防水仕様であるため、船舶での使用に適している。昨年度までに選定した以下の線量計をこのケースにパッケージ化した。

- | | |
|--------------------|------|
| ・ポータブルエリアモニター | 1 式 |
| ・GM 管式サーベイメータ（広口） | 1 式 |
| ・CeBr3 シンチレーション検出器 | 1 式 |
| ・半導体式ポケット個人線量計 | 20 個 |



図 3-31 線量計のパッケージ化

また、放射線モニタリング装置以外にも必要となる備品についてもアルミトランクケースへのパッケージ化を行った。放射線防護対策用品を準備しておく必要があり、放射性物質の吸引を防ぐマスクや手や被服に付着するのを防ぐ手袋や保護服を準備する必要もある。

- | | |
|--------------|------|
| ・防塵マスク | 20 枚 |
| ・マスク用フィルター | 20 枚 |
| ・サージカルマスク | 20 枚 |
| ・チオックス手袋 | 20 枚 |
| ・綿手袋 | 20 枚 |
| ・不織布製保護服 | 20 着 |
| ・養生シート | 1 巻 |
| ・大型ポリ袋（廃棄物用） | 30 枚 |



図 3-32 放射線防護対策用品のパッケージ化

実際にパッケージ化した放射線測定器や防護対策用品（図 3-31 及び図 3-32）は、平成 29 年 10 月に実施した神戸大学練習船「深江丸」での実験航海に積み込み運用した。搬入については全く問題がないことを確認した。

3.3.2 ドローン搭載用放射線測定器の選定／設計／改造 (H27～H29)

(再委託先：量子科学技術研究開発機構（ドローン搭載用放射線測定器に関する事柄）)

本サブテーマにおいては、まず、陸上及び飛行体によるモニタリングとして既に実用化されている技術を調べ、転用できる技術と開発すべき技術を明らかにした上で、ドローン搭載用小型放射線測定器候補を選定（一部、機器の試験及び改良を含む）し、それを用いたモニタリングシステムを構築した。

【H27～H28 年度】

(1) ドローン搭載用小型測定器について

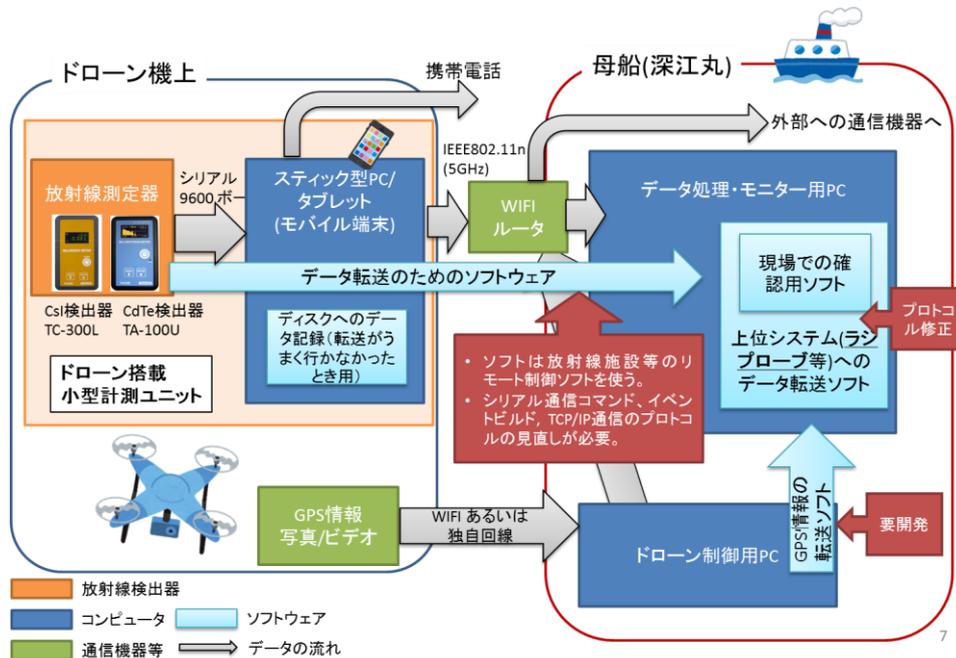
ドローンおよび船舶に搭載し、原子力災害等の緊急時の放射線線量を迅速にモニタリングするために必要な放射線検出器について検討を行った。緊急時のモニタリングには、ドローン等に搭載した放射線検出器で取得した線量計測結果を計測位置情報や時間情報と共に無線通信により、船舶上の制御コンピュータならびにオフサイトセンター等に設置するホストコンピュータへ転送・共有するシステムが必要である。このようなシステムとして、福島第一原子力発電所事故に対応するための陸路走行サーベイシステムが幾つか開発されており、既存の走行サーベイシステム（S. Kobayashi et al., Journal of Environmental Radioactivity 139 (2015) 281）を応用することとした。特に放医研チームが開発したラジプローブシステムでは、3G 回線の他、衛星電話にも対応しており、また固定された放射線検出器でなく、多様な汎用の放射線検出器との接続を取ることができる。

ドローンへ搭載した緊急時の線量モニタリングに適した機動性（小型、軽量、通信プロトコル等）や計測性能（計測核種、エネルギーレンジ、エネルギー分解能、計測感度等）の観点で放射線検出器（可搬型線量計）の選定を行った。事前のカタログチェックから 6 種類に絞り、さらに精査した結果、本研究においてドローンに搭載するための仕様を満足するのは、TechnoAP 社製の TC-300L が適合であると判断した。

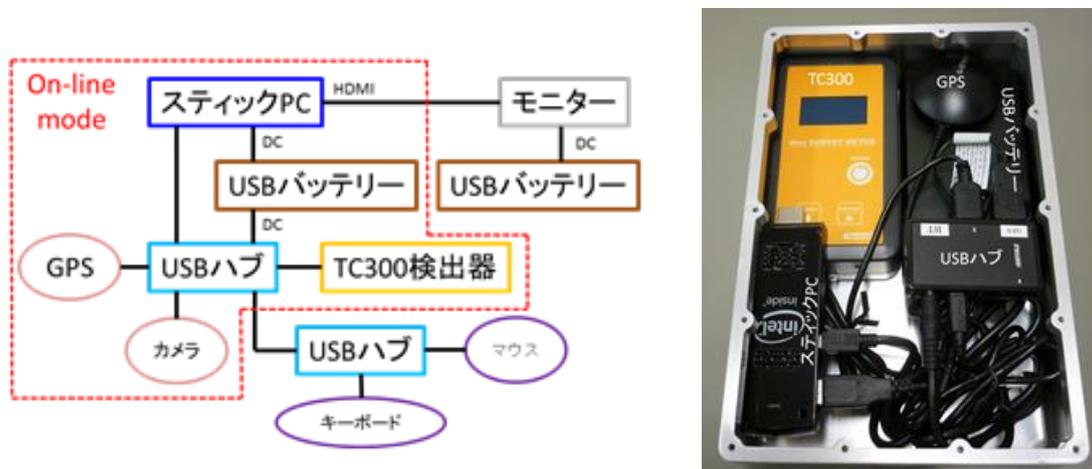
次に、ドローンに装着するための小型線量計の仕様に基づき、固定用治具（海上での使用のため防塩・防滴仕様）を設計・製作した。アダプタならびにハウジング蓋はデルリン樹脂にすることで、通信用電波の送受信を可能とし、また、ハウジング本体についてはアルミニウムをアルマイト加工することで、強度を改善した。

(2) モニタリングシステムの構築

ドローンおよび船舶に搭載し、原子力災害等の緊急時の放射線線量を迅速にモニタリングし、放出核種を同定するために必要な放射線検出システムの試作ならびに動作実証を行った。ドローンに搭載した放射線検出器で取得した線量及びエネルギースペクトル計測結果を位置情報や時間情報とともに無線通信により、船舶上の制御コンピュータならびにオフサイトセンター等に設置するホストコンピュータへ転送・共有するシステムが必要である。船舶上の測定プロトコルを図 3-33 に、これらを組み込んだドローン搭載用モニタリングシステムを図 3-34 に示す。



ドローンに搭載するプローブ小型検出器 (TechnoAP: TC300L) 自体のサイズは、外寸 W75 x H135 x D35 (mm) で重量約 340g であり、 $0.001\mu\text{Sv/hr} \sim 10\mu\text{Sv/hr}$ の線量計測ダイナミックレンジを有し、ガンマ線エネルギーレンジ 150keV \sim 3MeV においてエネルギースペクトルをエネルギー分解能 7%程度 (@662keV) で計測可能なものである。制御端末として、スティック PC (インテル(R) Compute Stick: OS/Windows8.1, CPU/Atom Z3735F(1.33GHz), メモリ/2GB, ストレージ/32GB ならびに Levono ideacentre Stick300 90ER0002JP: OS/Windows 8.1, CPU/AtomZ3735F(1.33GHz), メモリ/2GB, ストレージ/32GB) を用いた。GPS レシーバ (東京通商: BU-353 S4) により 2.5m 程度の位置精度ならびにカメラ (Logicool: HD ウェブカム C270) による静止画像撮影 (300 万画素) 機能を加えた。放射線モニタリングシステムのダイアグラムを図 3-32 の左図に示す。全ての機器は USB 給電により駆動し、Li イオンバッテリー (SONY: CP-S15) で約 2 時間動作する構成となっている。



固定治具内に、小型放射線検出器、スティック PC、GPS 受信機、電源バッテリー等を搭載時の様子を図 3-34 の右図に示す。オンラインモード（同図左の赤枠点線内）における重量は総計 1.7kg である。オンラインモードにおいて、放射線線量とエネルギースペクトル、時刻・位置、カメラ画像を取得する仕様となっている。

(3) ドローンの選定

無人航空機には、ラジコンヘリやラジコン飛行機等が含まれるが、本プロジェクトでは、比較的操作が簡易で、かつ、容易に導入可能なマルチコプターを採用することとした。マルチコプターの選定にあたって、販売数が多く定評のある 2 社の機種を比較した。いずれもペイロード（搭載可能重量）が 1 kg 以上あることから、線量率計 TC300L が搭載可能であることが分かった。また、どちらの機種も地図アプリケーションと GPS を併用することによって、自動航行可能であるため、モニタリングを行う上で十分な性能を有している。

機種選定を行っている途中で、オートパイロットに関する問題があることが分かった。現在市販されている多くのマルチコプターは、基幹部品であるオートパイロットが海外製（主に中国）であることが判明した。オートパイロットは、加速度計やジャイロスコープなどの各種センサーを用いて機体の状態を把握し、状況に応じて方向舵や補助翼などを自動で操作するシステムであり、GPS 信号による飛行場所や時間のデータを記録している。機体がネットワークに繋がれた機体制御用端末とペアリングすると、オートパイロット内のデータは自動的にメーカー（中国）のサーバーへ送信されることになる。本事業では原子力発電所周辺のモニタリングを行うことを想定しているため、セキュリティの観点から、海外メーカーのサーバーへ飛行データを送信することは避けるべきと考え、国内メーカーのマルチコプターから選定することにした。

国産の自社開発オートパイロットであることに加えて、耐風速が 10 m/s と他社の製品と比べて安定度が高く、搭載可能重量も 3 kg であり放射線測定器も十分搭載可能と言った理由から、株式会社自律制御システム研究所の ACSL-PF1 が最も適した機種と判断し選定した。ドローン（ACSL-PF1）とその仕様を図 3-35 に示す。

型番	PF1	
	全長	1,120mm
構造	高さ	483mm（アンテナ含む）
	容量	10,000mAh×2
バッテリー	公称電圧	22.2V
	タイプ	LiPo 6S
性能	飛行速度	水平10m~20m/s 上昇下降3m/s
	耐風速	10m/s
	高度	150m（航空法上限）
	耐水性	IPX3
	フライトレコーダー	標準装備
	推奨ペイロード	3kg
	飛行可能時間 (3.6V電圧アラーム時)	27min（ペイロード0kg）
		17min（ペイロード2kg）
		10min（ペイロード3kg）

図 3-35 購入したドローン（ACSL-PF1）とその仕様

【H29 年度】

平成 29 年 9 月 7 日（大島丸） および 10 月 5～6 日（深江丸） の 2 回にわたって実航海実験を行った。大島丸実験では、出港から目的地までの航路上の線量モニタリングを実施し、図 3-36 のように適切に航路に沿って線量計測できることを実証した。ドローン搭載用放射線モニタリングシステムを用いて、山口県大島郡周防大島町・小松港から四国電力伊方原子力発電所の沖 1km 間の往復航路に沿って線量データがマッピングされている様子を示している。なお、地図上の青線は線量率に対応しており、線量率値は常時モニター（左下は線量率の時間変化、右数値は現在の線量率値）されると同時に、1 分ごとにエネルギースペクトルを測定している（右上図）。

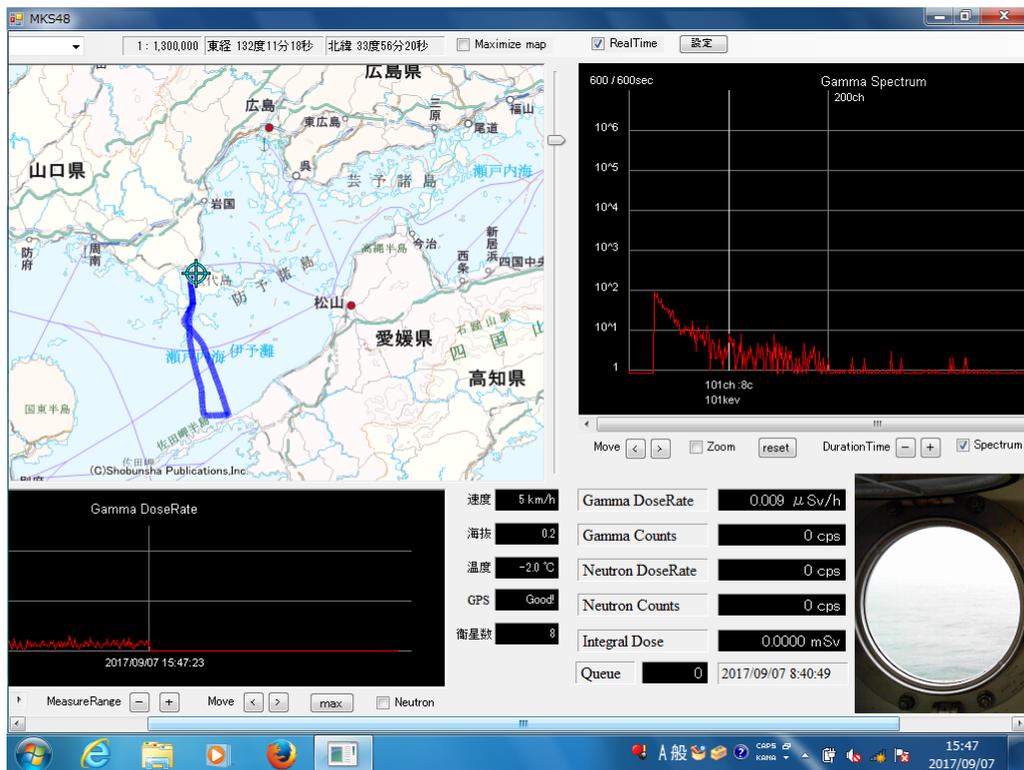


図 3-36 ドローン搭載用放射線モニタリングシステムによる測定結果の一例

10 月の深江丸での実験では、航路線量モニタリングの実施とともに、支援システムとして、図 3-37 のように CsI(Tl) 検出器、大型 NaI(Tl) シンチレーション検出器、電離箱サーベイメータ、CdTe 検出器を持ち込んで比較実験を実施した。目的地（関西電力御坊火力発電所沖）においては、図 3-38 のようにドローン（ASCL/PF1）下部に放医研で作製された線量モニタリングシステムを取り付け、ドローン飛行中の線量データを取得する実験を実施した（図 3-39）。ドローンの操縦性については、当日の気象条件（風速 5～8 m/s、天候曇り）では、スムーズに離発着及び飛行できることが確認できた。ドローンの通信プロトコルについても 2.4GHz 帯を利用しているため、オンライン通信との干渉が懸念されたが、問題ないことを確認した。線量率のデータ取得時にドローンの駆動モーター等からの電磁波ノイズの影響を少なからず受けるが、電磁波シールド設計および線量計の検出閾値レベルの設定により解決することができると考えられる。



図 3-37 深江丸実験に持ち込んだ放射線測定器一式



図 3-38 線量モニタリングシステムを取り付けたドローン



図 3-39 ドローンによるモニタリング実験

3.3.3 無人小型ボートによる緊急時及び平時の放射線モニタリング技術の開発 (H27～H29)

原子力災害時に船舶を活用した放射線モニタリングはその機動性や陸域のデータが補完できるなど有効性が高いと考えられるが、一方でその船舶（母船）が近づけないような高放射線レベルの状況下では、この母船を基地とする無人の観測プラットフォーム、すなわち、無線で制御される無人ボートや波浪の影響を比較的受けにくい無人水中航走体などを活用することが考えられる。本サブテーマでは、小型ボートによる放射線モニタリングの可能性を追求することを目的とした。

【H27～H28 年度】

まず、全長 3m 以下の無人小型ボートについて調査した。一覧を表 3-6 に示す。

表 3-6 無人小型ボートの一覧 (1)

番号	B1	B2	B3	B4	B5	B6
長さ(m)	0.76	1.01	1.16	2.97	1.06	1.20
幅(m)	0.190	0.300	0.247	0.539	0.270	0.350
重量(kg)	1.70	1.75	14.30	184.00	13.00	16.00
制御可能距離	500m程度	500m程度	100m程度	100m程度	500m	500m
航行速度(kt)	10程度	10程度	1～2(推定)	1～2(推定)	2kt	2kt
航続時間又は距離	数分	数分	10分程度	10分程度	2時間 /7.2km	2時間 /7.2km
ペイロード(kg)	0	0	2(推定)	2(推定)	0～2 (バッテリー と入れ替える)	0～2 (バッテリー と入れ替える)
価格(円)	数万	約1万	約300万	数百万	約450万	約600万
用途	ホビー用	ホビー用	水槽実験用	水槽実験用	観測用	観測用
メーカー又は所有者	Krick	不詳	北海道大学	海上技術安全研究所	コデン	コデン
製品名称	HE 4 police boat modular Krick 20330	Admiral 757-NQD	試作品	実験用	RC-S2	RC-S3

廉価なホビー用のもの B1 と B2 は軽量でハンドリングには極めて優れているものの、ペイロードが少なく、また、航続時間も長くないものがほとんどで、実際の放射線観測への適用はできないと考えられる。

次に、B3 及び B4 に示す船舶工学分野の操縦性試験用に使われる無線操縦の小型模型船について検討を行った。一般的には、この用途に使われる模型船は長さが 2～5m 程度であるが、その実績が豊富なことに加えて、5kg 程度以上のペイロードがとれるものが多いので、実海域での放射線観測に応用できる可能性は十分ある。一方で、この小型模型船は屋内の水槽実験設備での使用を前提に設計されているため、全天候対応とするための配慮が必要である。加えて本船の位置計測方法は屋内仕様という前提のため、光学式のものや水中音響を活用したものが主流であるが、実海域での使用を考えると GPS の導入が不可欠と思われる。加えて、実海域で決められた航路を自動的に航走させるため自律航行にかかる機器やソフトウェアの搭載も必要である。このような観点から、実験用無線操縦小型模型船を応用発展さ

せて、実海域での放射線計測を担う小型実験船を今後開発できるものと考えられる。また、航路設定が可能となれば、平時での海水中放射能濃度測定への適用も期待できる。

B5、B6 は、ダムなどでの測深を目的として、すでに製品化されている自律走行が可能な無線ボートである。いずれも GPS を搭載し予め計画され測線上を航行することが可能で、航行可能時間およびデータ取得範囲は 2 時間および 500m 程度でありいずれも放射線計測への実用ができると考えられる。またメーカーの聞き取り調査では、既に福島第一原発沖での測深作業に従事した実績があり、本研究が対象とする放射線観測でも運用できると考えられる。一方で、本体の重量が 13kg および 16kg であり、搭載する機器重量がたとえ 1kg 程度であっても船体の安定性に影響がでることと、重量が増すことによって航行時間が少なくなることに対応するため、装備機器の搭載位置の再検討・再設計が必要であると考えられる。

【H29 年度】

(1) 無人ボートの継続検討

検討対象を小型舟艇から中型まで拡大し、調査を継続した。対象一覧を表 3-7 に示す。

表 3-7 無人小型ボートの一覧 (2)

	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
	C-Enduro	C-Worker 4	C-Worker 5	C-Worker 6	C-Worker 7	C-Worker 8	C-Worker 12 P	C-Cat 2
長さ(m)	4.2	4.2	5.5	5.8	7.2	7.7	12.17	2.4
幅(m)	2.4	1.6	1.7	2.2	2.3	2.1	3.66	1.2
喫水(m)	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.99	1.17	0.2
高さ(m)	2.8	-	1.8	4.75	4.2	4.24	3.95	-
重量(kg)	350 (軽貨)	680 (軽貨)	1900 (軽貨)	3,500 (軽貨)	5,300 (軽貨)	3,700 (軽貨)	14,500 (軽貨)	80(軽貨)
最大速度(kt)	6.5	7.0	10	6.5	6.5	10	10	5
運用時間	数時間(推定)	48時間	7ノットにて5日間	5日程度(推定)	5日程度(推定)	4ノットにて7日間	8ノットにて20日間	6時間
ペイロード(kg)	10(推定)	20	20	80(推定)	80(推定)	1100	100(推定)	2(推定)

	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22
	C-Target 3	C-Target 6	C-Target 9	C-Target 13	C Sweep	C-Stat 2	C-Hunter	C Cat4
長さ(m)	3.5	6.5	9.6	12.9	10.8	2.7	6.3	4.3
幅(m)	1.4	2.1	2.4	2.7	3.5	1.44	0.6	2.9
喫水(m)	0.6	0.3	0.4	0.5	0.7	0.65	-	0.6
高さ(m)	1.3	2.3	3.5	3.9	2.9	3.19	-	2.5
重量(kg)	325 (軽貨)	1200 (軽貨)	2750 (軽貨)	4200 (軽貨)	9000 (軽貨)	750 (満載時885)	2000	650 (軽貨)
最大速度(kt)	25	35	50	45	25	4	2~3 (推定)	6
運用時間	1日程度(推定)	1日程度(推定)	1日程度(推定)	1日程度(推定)	230マイル	3.5ノットにて5日間	1日程度(推定)	48時間
ペイロード(kg)	10(推定)	60(推定)	80(推定)	100(推定)	100(推定)	20	300	15(推定)

Autonomous Surface Vehicles (ASV) Ltd. (代理店；東陽テクニカ) の製品は注文生産品であり、数千万以上の高価であるが、実海域での使用を想定して設計され実績もあるため、放射線計測への実運用の有望な候補システムととらえることができる。

B7(C-Enduro) は、図 3-40 に示すように 1200W のソーラーパネルと 720W の風車を設けていることに特徴がある。喫水のわりに幅が広く安定性は良好であると思われるが、ペイロードが少ない構造なので実務的な課題があると思われる。重量は 350kg とハンドリングも比較的容易である。図 3-41 に示す B8(C-Worker 4) も幅のわりに喫水が小さく横安定性は良好であると思われ、またペイロードも 20kg あることと、重量が 680kg と軽量ではないものの、船長 50m の深江丸程度の船舶から昇降も可能であり、さらに運用時間が 48 時間あることから、有事に船舶が立ち入ることができない水域を比較的詳細に計測が遂行できると思われる。



図 3-40 B7(C-Enduro) 外観



図 3-41 B8(C-worker 4) 外観

B9～B12(C-Worker 5、C-Worker 6、C-Worker 7、C-Worker 8)の外観を図 3-42 から図 3-45 に示すが、いずれも有事想定海域の放射線計測に十分な航続距離が達成できるが、重量が 1900kg ～ 5300kg と大きく、専用の昇降装置を有しない船舶を母船とする場合には、当該観測用無人ボートの積み込み、現地での計測のための昇降が容易ではない。



図 3-42 B9(C-Worker 5)外観



図 3-43 B10(C-Worker 6) 外観



図 3-44 B11(C-Worker 7) 外観



図 3-45 B12(C-Worker 8) 外観

また、図 3-46 に示す B13(C Worker 12P) は、プレジャーボートや漁船規模のサイズがあり、航走距離としては十分であるが、別の船舶に搭載して現地での昇降作業は容易ではない。むしろ現地までは有人で操船して出向き、当該観測水域近くで無線自律航行に切り替える運用と考えられる。専用の母船が無くとも運用できるという特徴がある。図 3-47 に示す B14(C-Cat2) は、重量が 80kg とハンドリングには好適だが、航続時間が 6 時間と小さく当該海域の詳細な計測には限界があると思われる。



図 3-46 B13(C-Worker 12P) 外観



図 3-47 B14(C-Cat2) 外観

図 3-48～図 3-51 に示す B15～B18(C-Target 3、C-Target 6、C-Target 9、C-Target 13) は、既往の有人船舶をベースに自動運航機能を付加したものと思われる。重量は 325～4200 kg(軽貨)である。航行モードも完全な自律ではないようである。



図 3-48 B15(C-Target 3) 外観



図 3-49 B16(C-Target 6) 外観



図 3-50 B17(C-Target 9) 外観



図 3-51 B18(C-Target 13) 外観

図 3-52 に示す B19(C-Sweep) は、長さ 10.8m、重量 9,000kg とこの類の船舶としては大型である。最大速度 25 ノットで航続距離も 230 マイル(426km)と極めて大きく今回の放射線計測にはオーバースペックである。図 3-53 に示す B20(C-Stat 2) は長さ 2.7m、重量 750kg、航続距離は 3.5 ノットで 5 日間であるがやや重量が大きいこと、安定性に課題がありそうであることなどを除けば放射線計測には充分である。



図 3-52 B19(C-Sweep) 外観



図 3-53 B20(C-Stat) 外観

図 3-54、図 3-55 に示す C-Hunter は半潜水式の航走体で、浮上・半潜水いずれの状態でも航行できるようである。重量は 2,000kg と比較的重く取り扱いは容易でない。



図 3-54 B21(C-Hunter) の外観 (浮上時)



図 3-55 B21(C-Hunter) の外観 (半潜水時)

図 3-56 に示すものは 動揺安定性が良好な双胴型の B22(C-Cat 4) である。重量は 650kg、航続時間は 48 時間 と放射線計測には手ごろである。ただ放射線計測装置搭載には若干の改造が必要ではある。



図 3-56 B22(C Cat 4) の外観

以上 C Worker シリーズについて調査を行ったが、実務的な運用を鑑みると、この中では B7(C-Enduro)、B8(C-Worker 4)、B14(C-Cat 2)、B22(C-Cat 4) が海上での放射線計測に適用できるものと思われる。

なお後述する水中航走体と同様であるが、現地で母船か降下揚収する方法が課題である。A フレームと称される海洋観測装置降下揚収用のクレーンが船尾に備え付けられている場合は、静穏海域であれば降下揚収は比較的容易である。一方でそれを持たない船舶では甲板上に設置されたクレーンを使う場合は船体の動揺に伴いクレーンから吊り下げたボートが船上の構造物や舷側との接触に注意を払う必要がある。

(2) 自律型水中航走体の検討

次に AUV（自律型水中航走体）についての検討結果を表 3-8 に示す。AUV は自律航行が可能な水中ロボットで、あらかじめ決められた航路・深度に沿って自動的に航行するもので、海洋観測用としては全長が 2m 程度の小型のものから 10m 程度もの大型のものまで開発されている。一般的に AUV は特注品がほとんどなため価格が不詳な場合が多い。

表 3-8 海洋観測用自律型水中航走体例

番号	S1	S2	S3	S4
長さ(m)	10.70	2.20	3.25	1.60
幅(m)	1.300	1.200	0.324	0.190
重量(kg)	7,500	360	240	37
航行/計測可能距離又は時間	300km	1,000 mの電源および信号ケーブル付き	70時間	22時間 (1.5m/s)
価格(円)	数億?	数千万?	数千万?	1~2千万?
用途	科学観測用	科学観測用	科学観測用	科学観測用
メーカー又は所有者	Jamstec	SAAB	ウッズホール海洋研究所	ウッズホール海洋研究所
製品名称	URASHIMA	DOUBLE EAGLE MKII	REMUS600	REMUS100
番号	S5	S6	S7	S8
長さ(m)	1.80	4.4	1.41	1.1
幅(m)	0.200	1.08	0.76	0.7
重量(kg)	49	1,510	260	240
航行/計測可能距離又は時間	7時間	60km	8時間 (0.5m/s)	5時間 (1.3m/s)
価格(円)	1~2千万?	数千万?	数千万?	数千万?
用途	科学観測用	科学観測用	科学観測用	科学観測用
メーカー又は所有者	Teledyne Gavia ehf	東京大学	東京大学	九州工業大学
製品名称	Gavia Scientific (AUV)	R2D4	Tri-TON 2 (TT2)	ツナサンド (TUNA-SAND)

S1はURASHIMAと呼称され、JAMSTEC（海洋開発研究機構）が開発したもので最大水深が3,000m、航続距離が300km、重量7.5tと大規模の海洋観測のためのものである（図3-57参照）。簡易で小規模な計測には全く向かないがこのURASHIMAの技術を応用すると、高価ではあるが放射線の長期間かつ間歇的な観測を行う場合に応用できると考えられる。大型の専用のクレーンを保有する母船でないと観測が支援できないという課題がある。



図 3-57 自律型水中航走体 S1(うらしま) (JAMSTEC Web サイトより引用)

中規模観測のものとして S2、S3 が挙げられる。S2 の場合本体は母船と最大 1000m のテザーケーブルで繋がれているので、航走距離や時間に制約がないという特徴がある（一般的には AUV の範疇に入らないが、放射線計測が可能な遠隔操縦可能な水中航走体候補ということでこの表に示した）。S3 はウッズホール海洋研究所が開発した AUV で、70 時間の航走時間が確保できる点に特徴がある。一方で、これらの機器の海中への投入/揚収のためにもやはり汎用の大型クレーン設備が必要である。

代表的な小規模の AUV としては、ウッズホール海洋研究所で開発された図 3-58 に示す S4 (REMUS100) および S5 (Gavia Scientific) がある。重量はそれぞれ 37kg および 49kg とハンドリングが容易で、クレーンを装備しない船舶であっても仮設の投入/揚収治具を備えることで対応できると考えられる。計測時間も少なくとも数時間は可能なので、長期での観測でない限り実用できると判断できる。



図 3-58 自律型水中航走体 S4 (REMUS100)

S6 は、S1 の URASHIMA と比して、全長が 4.4m とやや小型であり、航続距離が 90km と放射線計測について実用範囲である。そのほかの S7、S8 は全長が 1.41m および 1.1m、重量が 260kg および 240kg とハンドリングは比較的容易であるが、航走距離は 14km 及び 23km 程度である。現場での実務的な放射線観測を考えると、S1 の URASHIMA あるいは S6 の R2D2 が有望であると思われる。なおいずれの水中航走体も母船からの降下、揚収にはボートと同様専用のクレーンが必要である。

(3) 実海域実験

以上の検討結果から、深江丸に搭載して揚収可能という条件から、B-6（コデン社製 RS-C3）を選択し、これを借用して実験を行った。使用した無人リモコンボートの諸元と外観を表 3-9 および 図 3-59 に示す。

表 3-9 深江丸実験に用いた小型ボートの諸元

全長	1.4m
幅	0.35m
重量	13kg
制御可能距離	500m
航行速度	4.5kt
航続時間	3.5 時間



図 3-59 深江丸実験に用いた無線小型ボート外観

陸域想定地点から海岸線に垂直な測線を設定した。沖合約 2km で停泊した船舶から、小型ボートを降下し、陸域想定地点にむけ下記に示す航路で航走させた。小型ボート航行中は、搭載している放射線測定器（テクノ AP 社 TC300L）でモニタリング測定を実施し、母船にデータを Wi-Fi 回線を使用して送信した。図 3-60 に測定プロトコルを示す。

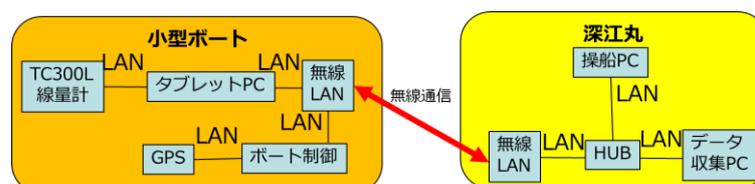


図 3-60 小型ボートによる測定プロトコルの概念図



図 3-61 小型ボート実験航行ルート

実験は2日にわたり、いずれも波高が0.5m程度の中で実施した。実験航行ルートを図3-61に示す(赤線:10月5日、緑線:10月6日)。無人ボートの降下揚収は、深江丸装備のクレーンを使うとともに、ダイバーの協力も得て概ね順調に実施できた。また自律航走も実施できたが、無線ボートが小型であったため、本船から数百メートル離れた場合には、波間に船影が隠れることがあり、深江丸からの継続的な視認が難しい状況もあった。また存在が確認できても無線小型ボートの方位がよく認識できないこともあった。放射線モニタリングにおいても、図3-62に示すように、通信が可能な距離においてはリアルタイム測定が可能であることを確認した。

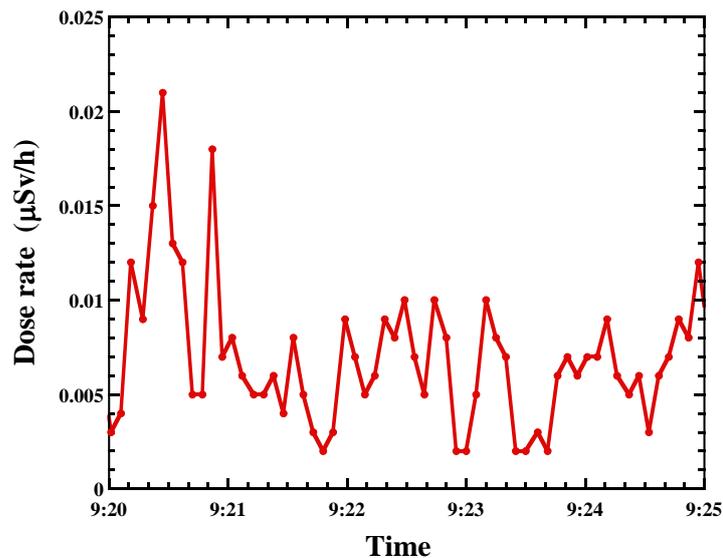


図 3-62 小型ボートによる空間線量率測定

3.4 研究推進 (H27~H29)

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、研究実施計画等を協議するため、研究推進委員会を平成 27 年度は 10 月及び 3 月、平成 28 年度は、7 月及び 12 月に行った。また、平成 29 年度は 6 月 26 日深江キャンパスにて（神戸大学：6 名、大島商船：2 名、量研放医研：2 名）、10 月 6 日深江丸にて（神戸大学：7 名、大島商船：1 名、量研放医研：3 名、福井大学：1 名）、及び、3 月 16 日深江キャンパスにて（神戸大学：5 名、大島商船：2 名、量研放医研：3 名、福井大学：1 名）それぞれ開催した（図 3-63）。

また、研究活動を紹介・公表するためにホームページで情報発信を行なった。図 3-64 にトップページのコピーを示す。



図 3-63 研究推進委員会



図 3-64 研究紹介ホームページ

4. 結言

この研究では、原子力発電所に何らかの異常が発生した際、陸上の交通網、通信網及び送電網が破壊された状態となった場合に、事前に構成しておいたネットワーク内の船舶に、必要な機材を搭載し、専門家が乗り込んで発災したサイトに急行し、海上前線基地として緊急時放射線モニタリングを行う、という災害対応バックアップシステムを提案しており、本受託事業では、このような船舶を活用した海上移動型放射線モニタリングシステムの開発を目的としている。

研究成果は、サブテーマ毎に次のようにまとめることができる。

(1) 船舶を活用した新システムの設計

① 全国の教育機関所属の船舶のネットワークの構築

船舶を有する大学等教育機関に対して、本プロジェクトの趣旨と目的を説明しネットワークへの参加の呼びかけを実施し、各機関所属練習船の運航状況など諸データを集約した。また、自動船舶識別装置を利用した各機関所属練習船の現在位置情報を表示するシステムを構築した。

② 船舶関係者に対する放射線教育プログラムの構築

大島商船高等専門学校及び神戸大学の船舶関係者に対する放射線教育や研修を実施するとともに、それらへの参加者に対するアンケート結果の分析を通して、船舶関係者用放射線教育プログラムを作成し、放射線教育に必要な機材を準備した。

③ 原子力防災体制の強化策の提案

「船舶を活用した海上前線基地の導入」という観点から、原子力災害対策指針の詳細な検討を行った。また、原子力発電所立地地域における防災対策の現状を調査するとともに、防災対策担当者等との合同の検討会・勉強会を通して船舶活用の有効性と問題点を整理した。原子力防災体制に関するシンポジウムを開催し、原子力発電所立地地域の防災対策担当者等との議論を通して、船舶を活用した放射線モニタリングの有効性と課題を整理し、提言書として関係者に配布した。

(2) 船舶への海上前線基地機能の付加

① 船外放射線モニターの設置と船内の放射線防護対策

実海域での実験航海を行い、練習船深江丸に設置した船外放射線モニターを運用し検証した。また、安全管理区域内における放射性物質取扱基準案の策定や除染対応策の検討を行った。

② 高線量率や高放射能濃度環境対策としての船内線量計算と遮蔽補強

船舶上空及び側面に放射性物質を含むプルームが存在すると仮定し、その高さ、広がり、厚さなどのパラメータを変化させ、モンテカルロ計算によって、プルームに含まれる放射能当たりの船内各所における平均吸収線量率を定量的に求めた。さらに揮発性及び気体状核種の動態を仮定した船内線量分布評価の精密化と区域分割

の精細化を図り、船橋（ブリッジ）や居住区域における外部被ばく低減のための遮蔽体補強対策をまとめた。また、内部被ばく低減の観点から、船内空調システムを調査し、ヨウ素フィルター等の空調フィルターの性能を確認した。

③通信基地としての機能も有する船橋の設計

通信回線使用料を勘案した実効的な通信データ量・通信速度を調査し、船舶に適した通信方法を検討した。実海域での実験航海を行い、練習船深江丸に設置した通信機器を運用するとともに、通信回線使用料と通信性能との関係を整理して、最適な通信システムを提言した。

(3)海上移動型モニタリングシステムの開発

①船舶に搭載する放射線モニタリング装置のパッケージ化

災害時に船内に持ち込むべき放射線測定器一式（複数の測定器、データ処理装置等）の選定を行った。アルミ製容器を用いてパッケージ化した放射線測定器一式を練習船深江丸に持ち込み、実海域での実験航海で運用した。これにより災害時にすばやく必要な機材を積み込めるであろうことを確認した。

②ドローン搭載用放射線測定器の選定／設計／改造

ドローンによるモニタリングの小型放射線測定器を設計すると共に、実際に運用できるドローンを選定した。実験航海において、ドローンの船上からの離発着時の操縦性や気象による影響を確認し、その有効性を実証した。

③無人小型ボートによる緊急時及び平時の放射線モニタリング技術の開発

市販の無人小型ボートの性能調査し、気象・海象の影響を受けにくい無人小型ボートで海域での実験を行い、性能及び実用性を確認した。

以上のように、当初予定していた目的は達成できた。