

市販CPU等半導体素子を使用したロボットおよび 無人建設重機の耐放射線性評価と 放射線環境下での管理方法

川 妻 伸 二^{*1} 浅 間 一^{*2}

Radiation Tolerance and Management Method of Robots and Unmanned Heavy Construction Machines using Semiconductors on the Shelf

Shinji Kawatsuma^{*1} and Hajime Asama^{*2}

There was not a guideline available for researchers, developers or users for robots or heavy construction machines on the evaluation of radiation tolerance and management method of robots and heavy construction machines using semiconductors, like as CPUs on the shelf, under radiation condition, when Fukushima daiichi NPPs accidents occurred on March 11th, 2011. The evaluation and the management method became necessary, in order to deploy robots like as QUINCE developing for big city accidents or unmanned heavy construction machines for landside disaster. According to "radiation tolerance data base on parts or materials" developed in 1980's to 1990's by Japan Atomic Energy Agency (JAEA), a guideline, for robots and unmanned heavy construction machines, was tentatively developed.

Key Words: Robot, Radiation Tolerance, Management Method, Nuclear Emergency Response

1. はじめに

福島第一原発事故が起きるまで、汎用半導体や材料を使用したロボットや無人建設重機（ロボット等）を放射線環境下で使うことは想定されていたものの、これらの汎用半導体素子や材料の耐放射線性の評価や放射線環境下で使用する際の管理方法について、放射線損傷の専門家ではない、ロボット等の研究者、開発者または使用者向けのガイドラインは存在しなかった。

土砂災害用に用いられている無人建設重機や、都市災害用に研究開発中の災害対応ロボット QUINCEなどを福島第一原子力発電所事故対応に投入するにあたり、これらに使われている汎用半導体や材料の耐放射線性の評価と放射線管理方策が必要となった。

そのため、日本原子力研究開発機構が1980-1990年代に構築した「耐放射線性機器・材料データベース」を基に、汎用半導体や材料を使用したロボット等の耐放射線性の概略評価を行うとともに放射線環境下で使用する際の管理方策を検討した。

2. 過去の研究例

原子力施設内の高放射線環境下に配置され装置や機器に使用されている電子回路の半導体、絶縁材やシール材などの有機材料、レンズや撮像管などの光学部品が放射線により損傷しやすいこと、これらの中でも半導体により放射線により損傷を受けやすいことなどが知られていた。さらに半導体の中でもCPUやCCD等（CPU等）の高集積半導体の耐放射線性が低いことも知られていた。

高集積半導体を含む電子回路の耐放射線性を向上させるためには、電子回路を鉛等で遮へいする方法、電子回路を放射線量の低い場所に移動する方法、高集積半導体からなる電子回路の放射線損傷をより受けにくい低集積半導体からなるディスクリート半導体からなる電子回路に置き換える方法、市販の高集積度半導体とは異なる母材や製造プロセスにより放射線損傷を受けにくい耐放射線性の高集積半導体を開発する方法、高集積半導体の放射線による放射線損傷とその特性変化を把握してその特性変化分を補う補償回路を付加する方法などがある。

CPU等高集積半導体を含む電子回路を鉛や鉄などで遮へいする方法は、重量とともに大きさが増加し、比較的小型のロボットではその走破性能が低下する。また無人重機では半導体を含む電子回路がエンジン、制御装置、センシング装置、通信装置などに分散しているため、何箇所にも遮へい体を設置する必要がある。更にCCDが使用されるカメラを鉛等で覆うことは、カ

原稿受付 2015年9月20日

^{*1}日本原子力研究開発機構

^{*2}東京大学

^{*1}Japan Atomic Energy Agency

^{*2}The University of Tokyo

■ 本論文は有用性（実証実験分野）で評価されました。

メラとしての機能を果たせなくなる。

CPU 等高集積半導体を含む電子回路を放射線量の低い場所に移動する方法は、両腕型サーボマニピュレータで採用されているが、モータやセンサと電子回路間を 100 芯以上の信号線や動力線で何十～何百 [m] の距離を接続する必要があった。そのため太い複合ケーブルで長い距離を引き回す必要があった。さらに動力線ではその距離に応じて電圧降下を考慮する必要もあった [1]。

CPU 等の高集積半導体自体の耐放射線性を向上させる方法の例としては、米国等で軍事用に開発した例がある。放射線損傷による特性変化の原因となる電子対を生成し難い半導体母材を採用したり、電子対が帯荷する絶縁体膜を薄くするプロセスを採用する方法などがある。米国で開発された耐放射線性半導体を輸入して使用方法もあるが、耐放射線性半導体が高価なことに加え、半導体の詳細仕様が開示されないこと、耐放射線性が保証されないこと、使用を終えたときには製造メーカーに CPU 等半導体を返品するか再利用不可能なように廃棄したことの証明が求められる。原子力施設内で使用する遠隔操作機器の多くは高放射線下のみならず、高汚染下にあり、このような環境下で装置や機器の中から CPU 等半導体を回収したり、再利用不可能となるように破壊することは、作業員の被ばく量の増加が懸念され、現実的ではないと判断された。動力炉・核燃料開発事業団（現、日本原子力研究開発機構）では、軍事用耐放射線性半導体と同様に半導体耐放射線性を考慮した母材やプロセスで、耐放射線性半導体を製作することを試みた例がある [2]。

しかしながら、CPU 等半導体の開発に費用と期間がかかるほか、日進月歩で進化し続ける CPU 等半導体素子の製造技術に併せて、常に新たな CPU 等半導体の製作をし続ける必要があり、この方法も現実性は少ない。

市販 CPU 等半導体の放射線による特性変化を把握してその変化を補償する回路を制作して付加する方法は、前述の方法に比べて比較的低コストで実施可能であることから現実的と考えられた。

動力炉・核燃料開発事業団では、高速炉使用済燃料再処理や高レベル廃液ガラス固化など高放射線下作業のために、1982 年から大型セル内遠隔保守技術の開発を進めてきた。これは幅 10 数 [m]、高さ 10 数 [m]、長さ約 20 [m] のセルと呼ばれる、厚さ約 1 [m]50 [cm] の放射線遮へいコンクリートで囲まれた部屋の中に、使用済み燃料や高レベル廃液など高放射線性物質を内蔵あるいはそれらにより汚染されたプロセス機器を配置し、これらのプロセス機器の保守補修が必要となったときに、遠隔操作型クレーン、両腕型サーボマニピュレータ等により、プロセス機器を保守や補修したり、場合によってはプロセス機器のリリースも遠隔操作で行おうというものである。

両腕型サーボマニピュレータは使用していないときも、高放射線下の大型遠隔セル内に保管されるため、より高い耐放射線性が要求された [1]。そのため、高集積半導体を用いた電子回路は、上述した、電子回路を線量率の低い場所に移設する方法、電子回路の中の高集積半導体を複数の低集積半導体に置き換えたデスクリート回路にする方法、半導体の放射線損傷に伴う特性変化を把握して、その変化を補償する回路を付加する方法が採

用された。

動力炉核燃料開発事業団では、上記のように両腕型バイラテラルサーボマニピュレータとその周辺の機器や装置の耐放射線性を向上させるため、文献から得られた半導体等の照射試験データや、自ら行った半導体等の照射試験データを蓄積し、「耐放射線性機器・材料データベース」として構築・整備した [3]。

本データベースは、半導体等の耐放射線性が放射線損傷メカニズムや、半導体の母材や製造プロセスに大きく依存していることなどを熟知した原子力ロボットの開発技術者が利用することを想定しており、原子力分野以外のロボット等の研究者や技術者、さらにはユーザが耐放射線性の概略評価するうえで有効ではなかった。

3. ガイドラインの必要性

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本太平洋沖地震に伴い発生した大津波により東京電力福島第一原子力発電所で発生した事故では、水素爆発に伴い大量の瓦礫とともに、放射性物質が原子炉建屋の内外に放出され、原子炉建屋周辺では空間線量率が 100 [mSv/h] を超える場所が多数観測された (Fig. 1 参照)。また原子炉建屋内では 1,000 [mSv/h] を超える区域も多数観測されている (Fig. 2 参照)。

この事故を収束するためにはアクセス路を確保するため原子炉建屋周辺の瓦礫を撤去するために無人建設重機が、原子炉建屋内の状況調査を行うためにロボットが、投入されることとなった。しかしながら、無人重機は 1990 年 6 月 3 日に発生した死者行方不明者 43 名に上った雲仙普賢岳大規模火砕流を契機に開発され、これまで 20 数年間にわたり、土石流などの危険がある場所での土砂撤去に使われてきたものである [4]。また、原子炉建屋内の状況調査のために米国などから提供された偵察ロボット PackBOT や都市災害用に研究開発段階だった QUINCE [5] を原子炉建屋内に投入されることも計画された。これらは耐放射線性などは考慮されていないか、耐放射線性について公表されていなかった。

福島第一原子力発電所事故では水素爆発で原子炉建屋の外に飛散したがれきは放射性物質等によって汚染されており、原子炉建屋周辺の線量率が 100 [mSv/h] 程度あり [6]、原子炉建屋内では 1,000 [mSv/h] 程度あり [7]、ロボットや無人建設重機に搭載された電子回路の CPU 等半導体が放射線損傷を受けて動かなくなると、原子炉建屋周辺のガレキ撤去や原子炉建屋内の調査が計画どおりできなくなるだけでなく、故障したロボットや無人建設重機が障害物となり、故障したロボットや無人建設重機を撤去するという余計な作業が増えることになる。そのため、無人重機の耐放射線性を評価するとともに、放射線環境下で管理する方法を検討する必要が生じた。

ロボットは電子部品が一箇所に集中配置されていることが多いが、無人建設重機はエンジン、油圧発生装置、通信装置、制御装置などのモジュールが、それぞれ専門メーカーで設計製造されており、それぞれに CPU 等半導体を含む電子回路を搭載していた。福島第一原子力発電所事故後に短期間で電子回路をデスクリートなものに変更して、ロボットのように CPU 等半導体を一箇所にまとめて、鉛等で遮へいすることは非現実

的であった。そのため、汎用半導体の耐放射線性を概略評価しておくことは極めて重要と考えられた。

政府・東電福島原子力発電所事故対策統合本部の下に設置されたりモートコントロール化プロジェクトチームにおいても、ロボット等に搭載されている CPU 等半導体の耐放射線性を評価する必要性が指摘された。

4. 市販 CPU 等半導体の耐放射線性評価

原子力機構では 1980 年代から 1990 年代初頭にかけて構築してきた「耐放射線機器・材料データベース [3]」に格納されている市販 CPU 等半導体や材料の照射試験結果を基に、ロボット等を構成している部材の耐放射線性を評価することとした。ロボット等は、モータ、ギア、タコジェネレータ、サーボドライバ、コンピュータ、カメラ、無線機等から構成されている。これらの中の絶縁材や被覆材や潤滑剤などの有機材料と半導体は耐放射線性が低いことが知られていた。そのため、「耐放射線機器・材料データベース [3]」から、有機材料としてケーブルとオイル、更に半導体の耐放射線性を **Table 1** にまとめた。その結果、半導体の耐放射線性が低めに見積もって 10 [Gy] であるのに対して、ケーブルやオイルなどの有機材料の耐放射線性は少なくとも 10 [kGy] 程度と、約 1,000 倍であり、ロボット等の耐放射線性は半導体の耐放射線性に依存することが分かる。そのため、半導体素子の耐放射線性について、より更に細分化して、**Table 2** のように整理した。

Table 2 からは半導体の中でも CPU やメモリ (CPU 等) や CCD の高集積半導体が、他の半導体と比べて耐放射線性が低いことが分かる。事実上、ロボット等の耐放射線性は CPU 等や CCD の高集積半導体の耐放射線性に依存している。これらの照射試験結果は、CPU 等で 20–100 [Gy]、CCD で 10–100 [Gy] であり、ともにおおむね数十 [Gy] の耐放射線性を有していると概略評価した。

東北大学、千葉工業大学および国際レスキューシステム研究機構が共同で開発したロボット QUINCE を原子炉建屋内デモ、より放射線量率が高いと想定されていた地下階や 5 階オペレー

Table 1 Rough Evaluation of radiation Tolerance of Parts for Robots and unmanned heavy machines

| | |
|----------------|------------|
| Semiconductors | 10–100k Gy |
| Cable | 1M–100M Gy |

Developed based on [3]

Table 2 Rough Evaluation of radiation Tolerance of Semiconductors on the shelf

| | |
|--------------------|------------|
| Semiconductors | 10–100k Gy |
| Cable | 1M–100M Gy |
| Oil | –10kGy |
| Bipolar Transister | 10k Gy |
| Bipolar Op Anmp | 100k Gy |
| CPU | 20–100 Gy |
| CCD | 10–100 Gy |

Developed based on [3]

ションフロアへの投入が検討されており、それらでの空間線量率は数 [mSv/h] から数 [Sv/h] であり、CPU 等半導体の耐放射線性は 1980–90 年代の照射試験結果ではなく、搭載予定の CPU 等半導体を用いた照射試験による実力値評価が必要となった。そのため、QUINCE に搭載する CPU 等半導体の放射線照射試験を 2011 年 4 月 15 日と 20 日の 2 回に分けて、日本原子力研究開発機構高崎研究所の照射試験施設にて実施した。その結果、カメラは集積線量 169 [Gy] で故障したが、制御回路等に必要となる CPU などの半導体は 200 [Gy] 以上の耐放射線性を示した。半導体の耐放射線性はロットによってばらつくことが知られており、照射試験に供した試験体数が少ないことからリスクはあるものの、QUINCE に搭載予定の CPU は 200 [Gy] 以上、カメラは 150 [Gy] 程度の耐放射線性を有すると判断した。

ロボット等の耐放射線性を向上させる方策としては、半導体素子を含む電子回路を遮へいするやり方は、独力で実施に行われているが、遮へい体の重量は数十から百 [kg] になる。半導体数個のみを遮へいするやり方もあり得るが、電子回路自体を特殊仕様新たに設計製作し直すというデメリットもある。以上より、現実的には半導体素子の選定あるいは放射線損傷による半導体素子の特性変化を補う補償回路の付加等により耐放射線性を向上させるのが、ロボット等では現実的と考える。補償回路の例としては、放射線により発生した電子孔のため、オペアンプ等の増幅率が変動するため、定期的に増幅率を自動的に計測し、増幅率の設定をし直す、というようなものである。

半導体素子の選定については、様々なメーカーで様々な母材や製造プロセスを用いて製造されていること、毎年新しい素子が開発され市販されていることから、あらゆる素子を照射試験し、耐放射線性を評価するのは現実的ではない。そのため、耐放射線性に大きく関係すると考えられる母材や素子の製造プロセス等ごとに分類して、複数の素子の照射試験を行い、その結果をもって耐放射線性を概略評価する方法が有効と考える。概略評価した耐放射線性から設定できる管理目標値では、ロボット等に期待する耐放射線性が不十分な場合は、個別に搭載予定の半導体素子等の照射試験を行い、管理目標値を設定することが必要になると考える。

5. 市販 CPU 等半導体の放射線管理方法の提案

2011 年 4 月 18 日の政府と東京電力が設置した福島原子力発電所事故対策統合本部リモートコントロール化チームの下の建設機械等の放射線耐性に関する検討会の第 1 回会合で、ロボットや無人建設重機が計画以上に放射線被ばくを受けて作業中に故障して、作業が継続できなくなったり、故障したロボットや無人建設重機の撤去という余計な作業が新たに発生しないように、ロボット等の CPU 等を含む電子回路付近にアミノグレイやガラス線量計などの集積線量計を取り付けて、放射線被ばく量を管理すること、ロボットや無人建設重機の被ばく量が管理目標値を超えそうになる前に、電子回路等を交換することを提案した。

管理目標値については、万が一、カメラが損傷しても他のロボットの映像等で、カメラが損傷したロボットの改修操作は可能であると判断された。データが古いものであったこと等から、

Table 3 Management Value for Robots and Unmanned Heavy

| | |
|-------------------|------------|
| Unmanned Machines | 20 Gy |
| Robots | 30 Gy |
| Quince Robot | 150-200 Gy |

Irradiation Test and radiation tolerance for CPU and others should be done in the case of use under higher radiation condition

CPU 等の耐放射線性を基に判断することとした。

CPU 等の半導体の耐放射線性は、参考文献 [3] の「耐放射線機器・材料データベース」に格納されていた、1980~90 年代の照射試験結果によるものであり、その後の半導体の高度化に伴い、福島第一原子力発電所事故当時の半導体母材は、ケイ素のほか、ガリウムヒ素なども使用され始めていた。さらに炭化ケイ素を母材とするものも出始めていた。これらの母材特性から耐放射線性は向上していることも期待されたが [8]、耐放射線性の概略評価では保守的に、考慮しないこととした。

無人建設重機については、万が一故障すると、それ自身が障害物となり、その後のロボットによる遠隔作業に支障が出ることから、保守的（安全側）に照射試験結果で最も低い値である 20 [Gy] とした。

ロボットについては、原子炉建屋周辺よりも線量率が高いと推測された原子炉建屋内に投入され、無人建設重機よりも被ばく線量が高いと推測されたこと、無人建設重機と比べるとより小さく万が一故障しても短時間で作業員が回収したり、通路わきに蹴り寄せることも可能と判断されたことなどから、管理目標値は、概略評価された数十 [Gy] よりは保守的（安全側）で、多少裕度を少な目に見積もった 30 [Gy] とした。

QUINCE については、より高い放射線量率下での作業を想定していることから、万が一の故障時に、他のロボットの画像情報の提供などの支援や、作業員の入域による通路わきへの蹴り寄せ等は、期待できる可能性が少ない。管理目標値は、個別に行った CPU 等や CCD 半導体の照射試験結果から評価された耐放射線性である 150~200 [Gy] とした。

以上から管理目標値を **Table 3** のようにまとめた。

6. 結 論

3 章および 4 章での検討を踏まえ、「汎用重機やロボットにおける耐放射線性評価と管理方法の基本的な考え方」としてガイドラインをまとめ、2011 年 4 月 25 日に開催された福島原子力発電所事故対策統合本部リモートコントロール化チーム建設機械等の放射線耐性に関する検討会の第 2 回会合で提案し、参加メンバーの了承を得て、2011 年 4 月 27 日に開催された福島原子力発電所事故対策統合本部リモートコントロール化プロジェクトチームに報告した。

本ガイドラインは、建設重機やロボットの製造開発や運用を行っていた同検討会メンバーに配布するとともに、超学会組織「対災害ロボティクス・タスクフォース (ROBOTAD)」の協力を得て、同組織の公式ブログ上で公開した [9]。

このガイドラインは無人建設重機や BROKK を投入した大成建設、PACKBOT や QUINCE を投入した東京電力において運用された。

福島第一原子力発電所事故発生後 4 年経った 2015 年 3 月 11 日までに、50 台近い無人重機やロボットが投入されたが、これまでに放射線損傷が原因で未帰還となっているロボットは確認されていない。

7. 考 察

ロボットや無人建設重機等の研究者、開発者、使用者は、必ずしも放射線損傷に詳しくなかった、一方で、半導体や材料の放射線損傷の研究者は、半導体損傷のメカニズムや、材料ごとの損傷程度に関心が行きがちでロボットや無人建設重機の設計や構造についても詳しくなかった。この両者の間のギャップを埋めるべく、汎用半導体ごとの耐放射線性の評価や放射線環境下での管理方法をガイドラインとしてまとめておくことは、今後の福島第一原子力発電所の廃炉作業に使用するロボットや機器を研究、開発および使用していくうえで重要である。

事故後の 4 月 27 日にガイドラインとしてまとめた「汎用重機やロボットにおける耐放射線性評価と管理方法の基本的な考え方 第 1 版」は、1980~90 年代に使われていた半導体等の照射試験データベースを基に構築されたものである。現時点ではガリウムヒ素を母材とする半導体も多く存在し、これらの照射試験データが不足している。

さらに、ロボット等に使われる半導体は日進月歩であることから、今後広く普及すると考えられる炭化ケイ素やダイヤモンド半導体についても照射試験データを取得し、CPU 等半導体の耐放射線性の概略評価を進めていく必要がある。しかしながら、電子回路に使用される半導体の種類は多種多様であり、これらすべての、最新の半導体の照射試験データを蓄積しておくことは、相当の労力と予算を必要とし、このための予算を確保することは、平時が続く中では徐々に困難となり、結果として予算を確保できず、ガイドラインの更新を行っていくことも不可能となる。このような状況を回避する方策として、放射線による損傷のレベルが最も大きい CPU や CCD についてのみ、照射試験を継続し、ガイドラインの改訂の要否を検討しておくだけでも有効であると考えられる。

現時点では原子炉建屋内でのロボット等の使用が主と考えられるが、今後は格納容器内や原子炉容器内に進入する機器や装置が必要となる。これまでの格納容器内部調査の結果 [10] から、10~100 [Sv/h] 程度の放射線環境以上となることが予想される。**Fig. 3** 参照。

このような高放射線環境下では、半導体母材のガリウムヒ素や炭化ケイ素に伴う半導体の耐放射線性向上に期待するだけでは不十分であり、CPU や CCD など高集積半導体の放射線による放射線損傷とその特性変化を把握して、その特性変化分を補う補償回路を付加する方法についても、検討を早期に開始する必要がある。

謝 辞 「汎用重機やロボットにおける耐放射線性評価と管理方法の基本的な考え方 第 1 版」の作成に際しては、検討会に参加した方々から貴重なご意見をいただいた。特に、大成建設の立石氏および伊東氏ならびに元東京電力の矢野氏には事故現場の状況や無人建設重機に関してご教示いただいた。また、ガイドライン作成に際し、元米国オークリッジ国立研究所の James

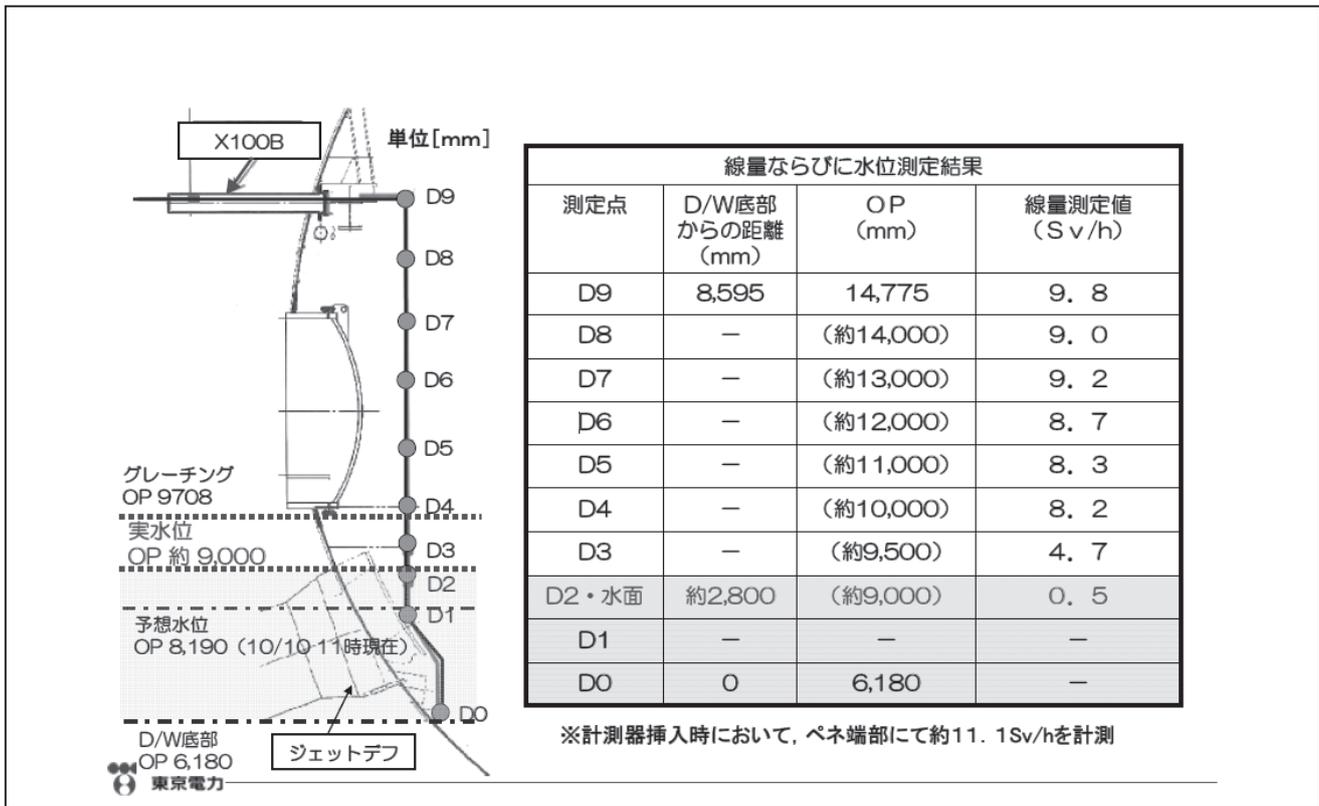


Fig. 3 Water level and dose level in the primary Reactor Vessel of Fukushima daiichi NPP unit 1 [10]

Hannah 氏にアドバイスをいただいた。これらの方々に感謝する。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構東海事業所「両腕型サーボマニピュレータの開発総括報告書(制御関連他)」、JNC-TN8440 2000-001, 1999年3月。
- [2] 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所「耐放射線マイクロコンピュータの開発」、PNC TJ8216 98-003, 1998年3月。
- [3] 福島、川妻ほか「耐放射線性機器・材料データベースの構築・整備」、PNC TN8410 93-192, 1993/5。
- [4] <http://www.kenmukyou.gr.jp/f.souti.htm>
- [5] 日本ロボット学会東日本震災関連委員会原子力関係記録作成分科会

「原子力ロボット記録と提言 本文」, 2014/10/1.

- [6] <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/surveymap/images/fl-sv-20110323-j.pdf>
- [7] <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/images/fl-sv3-20130322-j.pdf>
- [8] 後川, 大西: “耐放射線強化素子研究の現状”, 応用物理, vol.55, no.3, pp.225-233, 1986.
- [9] <https://roboticstaskforce.files.wordpress.com/2011/05/20110427-rcpt-radiation.pdf>
- [10] 東京電力株式会社「福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部調査結果について」, 平成24年10月10日。 http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_121010_03-j.pdf



川妻伸二 (Shinji Kawatsuma)

1982年3月早稲田大学理工学部機械工学科卒業。動力炉・核燃料開発事業団(現日本原子力研究開発機構)勤務。1982年よりパワーマニピュレータ、サーボマニピュレータ、遠隔電気コネクタ、遠隔配管コネクタ、耐放射線電子回路など、高放射線下かつ高汚染下で使用する遠隔操作システムなどの開発に従事。福島第一原子力発電所事故対応のための原子力用ロボット等を担当。2012年10月から原子力緊急時遠隔機材整備に従事。日本原子力学会、日本保健物理学会、日本機械学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



浅間 一 (Hajime Asama)

1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年理化学研究所研究員補。同研究所研究員、副主任研究員等を経て、2002年東京大学人工物工学研究センター教授。2009年より東京大学大学院工学系研究科教授。現在に至る。サービスロボティクス、自律分散・空間知能化、移動知・脳内身体表現、サービス工学の研究等に従事。日本機械学会フェロー、工学博士(東京大学)。

(日本ロボット学会正会員・フェロー)