

## 第25回原子力委員会定例会議議事録

1. 日 時 令和3年8月3日（火） 14:00～15:06

2. 場 所 中央合同庁舎第8号館6階623会議室

3. 出席者 内閣府  
内閣府原子力委員会  
上坂委員長、中西委員  
内閣府原子力政策担当室  
進藤参事官  
中央大学理工学部  
大隅教授

### 4. 議 題

- (1) 福島第一原子力発電所の廃炉に向けたロボット技術の現状と課題について（中央大学 大隅氏）
- (2) その他

### 5. 審議事項

（上坂委員長）それでは、お時間になりましたので、第25回原子力委員会定例会議を開催いたします。

本日の議題ですけれども、一つ目が福島第一原子力発電所の廃炉に向けたロボット技術の現状と課題について（中央大学 大隅先生）、二つ目がその他です。

それでは、事務局から説明、お願いいたします。

（進藤参事官）一つ目の議題は、福島第一原子力発電所の廃炉に向けたロボット技術の現状と課題についてです。本日は、中央大学理工学部教授大隅久様より御説明いただきます。

それでは、御説明、お願いいたします。

（大隅教授）それでは、早速始めさせていただきたいと思います。

私、中央大学の大隅と申します。

今、日本原子力学会の福島第一原子力発電所の廃炉検討委員会の委員をさせていただいております。それから、私は専門がロボットでございまして、日本ロボット学会の廃炉に向けたロボットの調査研究と社会貢献に関する研究会と、こちらの方も委員を務めさせていただいております。

今日は、ロボットの専門の立場から福島第一原発の廃炉に向けたロボット技術ということで、私なりの認識になりますが、そちらの方を御紹介させていただきたいと思います。

今日の内容ですけれども、まず最初に、ロボット技術とはということで、ロボットという言葉を知ると、多くの皆さんは人の形の物を連想したり、いろんな物を連想させるわけですが、ロボットとは何か、このロボット技術、どういうふうに作られていくのかと、そんな観点からまず最初に簡単に、スライド1枚ですけれども御説明をさせていただきます。

それから、福島原発でこれまで利用されてきたロボットの利用実績と、どんな特徴があったかというのを簡単にお話をします。

今、事故があって10年経過したところですが、いよいよこれからデブリの取り出し作業というのが本格的に始まると、今、こんな段階になっておりまして、このデブリ取り出し作業というのがこれまで利用されてきた作業と本質的に何が違うのか、どこが難しいのか、その点について御説明をさせていただきます。

最後、そのような中で、ロボット技術としてはどんな課題があるのか、こちらを簡単に御紹介いたしまして、最後、デブリ取り出しに向けてということでまとめさせていただきたいと思います。

それでは、早速ですけれども、まず最初、ロボット技術とはということで、ロボット、一般の話を最初に簡単にさせていただきたいと思います。

ロボットというのはそもそも何かというわけですが、人の格好をしたロボット、あるいは、動物の格好をしたロボット、いろいろありますけれども、その機械がロボットと呼ばれる大前提として、それまではなかった用途や、なかった機能、構造、こういう機械に対して皆さんが、これはロボットだと言ってくれれば、そういう特徴があります。

多くの家電は非常に進化をして、コンピューターが積んであって、炊飯器なんかも非常にいろんな炊き方がボタン一つでできるようになってはいますが、決して炊飯ロボットとは呼ばれない。炊飯器と呼ばれてしまいます。その炊飯器が自動になって、知能を持っていると、そういう、飽くまで、どれだけ進化しても炊飯器と呼ばれてしまうわけですが、犬の格好の機械ができました。

そうすると、それはこれまで全然そんな物はなく、そうするとそれを、これは犬型ロボットですと言ったら、皆さん、そうだ、そうだ、ロボットと呼ばれるようになるわけです。

こんな特徴があるわけですがけれども、その特徴を反映してというところもありますけれども、福島原発で事故がありました。そうすると、建屋の中に入り様子を見て帰ってきた。そんな機械は今あるかという、当時はなかったわけです。そうすると、皆さん、ロボットが必要だ、ロボットを入れればどうだと。今ないからロボットという言葉が自然に出てくるというところになります。

ただし、ここがロボットの難しいところなのですけれども、結局、ロボットというのは、それまでに成熟した技術でつくり上げられたスーツではなくて新しいものなので、そういう新しい機械、機能というものには実証試験というのが必要なのですね。何回も作って、試作をして、動かしてみ、駄目出しをして、それを繰り返すと初めて現場で安心して使えるようなものになっていくのですけれども、残念ながら、それが当時ありませんでした。

その結果どうなったかという、後で簡単に御紹介しますけれども、アメリカの軍用ロボットが利用されます。それはなぜかという、非常に確実に動くベース、軍用ロボットというのがあったわけです。そこにセンサー付けたり、カメラ付けたりということで、そういうのを流用する、改造する、こういう形で新しい現場にずっと入るロボットが、ある意味、出来上がったわけですがけれども、こんな特徴がまずあります。

ロボットというのは、本当に新しく作ろうと思うと、まずは試行錯誤、実証、こういうものが必要になります。それのないものはすぐには使えませんというのが一つの特徴。

それから、次ですがけれども、当然、新しい機能や、構造、コンセプトなど、そういうのを持った機械になりますから、では、誰が使うのですか、どういうふうについたら本当に役に立つのですかと。それは、ロボットを作る人が勝手に便利だろうと思って作っても決して使えるようにはならず、そのユーザーですね、それを求めている人と一緒に作っていくと、これが大事なことになります。

今、例えば、インフラ点検、橋の点検とかトンネルの点検、こういうもののロボット化というのが非常に多く試みられている、これから始まろうとしているところですがけれども、それをやろうと思ったら、やはり、その点検業者とか国交省とか、実際にその点検を必要とする人たち、そういう人たちと一緒に上げていくという必要があります。

また、出来上がるロボットですが、そういうロボットの性能というのは、どういう要素技術を組み合わせるか、その要素技術ですね。使った要素技術のレベルに応じて決まってい

ます。

ここにロボットはシステムインテグレーションの結果とありますけれども、いろいろな、ある機能を実現するのにいろいろな要素技術を持ってきて一つのシステムに統合した機械システム、これがロボットと呼ばれる物になるわけですが、そのロボットの性能自身は、その、例えば、位置を測るのにどんなセンサーを持ってきましたかと、カメラはどんなカメラを持ってきましたかと、それによって決まってくるということになります。

私が学生の頃というか、若い頃ですね、屋外でロボットの位置を完璧に知るなんていう技術はほとんどなかったのですが、今は、GPSなり、ディファレンシャルGPS、いろんなものがあって、衛星からの電波を使って物すごく正確に測るようになって、その結果、屋外でのロボット利用というのがぐっと実用化が進んだわけですね。例えば、ドローン飛ばしても位置が正確に分かるというふうになってきます。

今回の原発という、カメラが放射線に弱い。そうすると、それはやはりカメラの性能になくてはいけなくて、カメラの性能が悪いからロボットでと、そういうわけにはいかないというところがあります。

また、当然、そのときの組み合わせる要素技術、どういうものを持ってくるか、ここは、やっぱり、エンジニアの力量が問われるところでもあります。

最後、ロボットの利用目的に応じて環境との関連が変わると書きましたけれども、現場でロボットに活躍をしてもらおうと思ったときに、これには二つの考え方といいますか、プロセスがあります。

一つは、環境に合わせてロボットを作り込む。例えば、災害が起きました。その災害のところにロボットを使いたい。そうすると、その災害現場に入って行って動けるロボットじゃないと使い物になりません。ですから、そういう現場を想定して作ったロボットを持っていく。あるいは、そういう現場が与えられたときに、それに応じて、それに適応できるロボットを作って送り込むと、こういうことが必要になります。災害ロボットというのはそういう発想で作られるロボットになります。

これに対して、産業用ロボット、よく工場の中で部品を持ってどこか挿入したり、ねじを締めたり、そういうロボットというのは、ロボット単体は腕の格好をしていて、単にプログラムに言われたとおりに動くだけでそれしかやってくれないのですが、そのロボットの周りにベルトコンベヤーを持ってきて、カメラを持ってきて、ベルトコンベヤーから流れてくる部品を認識して位置まで正確に知ってロボットに教えてやる。そうするとロボットは簡

単につまむことができるというふうに、ロボット自身は割と単調なことしかやらないのだけれども、ロボットを利用する環境ですね、こちらを整備してやることによってロボットに別のパフォーマンスを発揮させると、こういう形でロボットを活用していく、こんなロボットもあります。

というか、こういう二つのアプローチがあると言った方がいいと思うのですがけれども、福島原発、どうかというと、これから廃炉作業というのは、特にデブリの取り出しに関しては10年単位のスパン、10年、20年、30年と、どれだけ掛かるか分からない、非常に掛かると言われています。

そうすると、かなりその中では単調な作業の繰り返しの部分が出てくるはずですが、そうすると、いかにそのロボットを効率的に利用してデブリを取り出すかという、その環境構築というのが非常に一つ重要になっていくと思われれます。

まとめますと、これまでのない用途に対してロボットは期待されておりますということが一つですね。

ただし、このロボット利用に関して起きる課題というのは、ロボットでという技術だけではないということです。要素技術も必要になるときもありますし、ロボットを使う環境の方をいかに整えるかと、こういうのをトータルで解決していかなければいけない問題であるということです。

さて、ここからは福島原発で利用されたロボットの実績を簡単に御紹介いたしますが、こちらはPackbotと言いまして、もともとアメリカの軍用ロボットになります。このベースの部分にマニピュレーター、これもアイロボットというルンバ作っている会社ですがけれども、こちらが作っているロボットになります。

このロボットはいろんな戦場でもう何千台と使われていて、非常に頑丈にできていて、使う方としては確実に動くという点で非常に安心感があるのではないかと思います。これが最初に福島原発の建屋に入っていったロボットになります。こちらの先にアームを付けて、ここにカメラを付けて、このひじのところにグリップありますけれども、これ2台中に入れていって、1台のカメラでもう一台を写して、こちらのロボットが扉を開けて入っていく、みたいな、こういうチームで入っていったロボットになります。2011年4月の初め、何回かあったと思うのですがけれども、最初のニュースで流れたような映像はこのロボットからのものになります。

今のアメリカの軍用ロボット、実績があつて、当時はそれしかないというお話をしました

けれども、こちらは日本の研究者によって開発をされた *Quince* というロボットになります。形、結構似ていますけれども、このフリッパーと呼ばれるのが前後に付いているところが特徴で、先ほどの *Packbot* と比べると階段の上る、踏破性と言いますか、それが非常に優れていて、*Packbot* は建屋の2階、3階ってたしか上がれなかったのですけれども、このロボットは階段を上ることができて上の階まで全部見れてきたという物になります。

こちらのロボットは、阪神・淡路大震災のときに震災を経験された先生たちが、ロボットの研究者が集まって、IRS、国際レスキューシステム研究機構というものを立ち上げて、そこで開発をして、出来上がってはレスキューの人に見てもらって、評価をしてもらって、また駄目出しをしてと、こういうのを繰り返して開発をされてきたロボットになります。

このロボットは6月の半ばから入りまして、2号機の建屋の5階まで全部見たりとか、このロボットがあって完全な冷温停止っていうのですか、それが実現をしたというロボットになります。

今、走り回って中を見てきますというロボットを2台紹介しましたがけれども、この福島原発では、これまで非常にロボットが使われています。また、種類も使われています。

こちらは東京電力のホームページに掲載されているものですがけれども、地下階だけでもボート型の物、それから、四脚のロボットもあります。あるいは、この辺は、構造的にはクローラーで走って、カメラで見たり、センサーを付けて水位を測ったり、こんなものだと思いますけれども、地下階ではこんな物が。

また、1階以上のフロアということで、これは今の *Packbot* ですね、*Packbot* に *Quince*、こちらアイロボット社、ちょっと小さいですけれども、ウォリアーと言って、やっぱり、軍用ロボットの利用になります。

ほかにも日本のメーカーが作ったいろんなロボットが使われて、除染とか干渉物撤去とか、中の調査だけではなくていろんな作業に使われております。

このほかにも、今のように、はい、これはロボットですと単体で存在するものだけではなくて、ロボットの技術として開発されたものがいっぱい使われています。代表的なものとしては、無人化施工というのがあるのですけれども、こちらは雲仙普賢岳の災害の後に、危険地帯ですね、下の方、麓の方の復旧作業のために国交省主導で開発が進められた技術になりまして、遠隔で重機をコントロールして、遠隔で作業する、建設作業を行うというものになります。

ただし、無人化施工とありますように、こういう建設作業みたいなものというのは、単に遠隔で操作ができればいいだけではなくて、遠隔で行うためにまたどういう順番で作っていくとか、ロボットの位置は何で測るとか、あるいは、コンクリート、ここは使いませんが、コンクリート使うようなときは、人がならさなくても自然にきれいに流れるコンクリートとかですね、いろんなものを組み合わせて出来上がる技術になります。

こちらが原発の構内ですね、構内の水素爆発で飛んだ瓦礫の撤去、建物へアクセスするための瓦礫撤去ですけれども、そういうものを行って、これが2011年4月中にかなり終わった、この技術のおかげできれいになったはずですよ。

こちらはコンクリートポンプ車ですね。使用済みの燃料プールの水がなくなると大変だということでもかなりもうハラハラいたしましたけれども、こちら、モニタリングしながら水を継続的に入れる、こちらの遠隔の操作システムみたいなものも開発をされています。

このほかにも本当に多様な技術が使われているのですが、例えば、ここにはちょっと書いてありませんが、1号機と2号機の間には排気筒というのがあって、それが倒れると危ない。これ、2019年からでしたかね、地元の、福島のエイブルという会社が担当して、きれいに、それを解体したと、あるいは、こちら、廃炉ロボット技術を磨くと、ゼネコンの調整、これ、日刊工業新聞の見出しなのですが、「遠隔クレーンにフル装備 | ロボットニュース」と書いてありますけれども、これは瓦礫で埋まった建屋の上部ですね、そこから瓦礫を取り除くときにクレーンを使ってクレーンの先にグリッパーを付けてそれで取り除いていくわけですけれども、グリッパーがクルクル、クルクル回転をしないようにグリッパーのところにプロペラを付けて位置をちゃんと、所望の位置に、姿勢に制御して取りましょと、そういう技術が開発されたということです。

さて、というわけで、いろんなロボット技術が入っているわけですけれども、現状どうなっているかといいますと、直後、まずは被災状況の調査、損傷の調査ですね。それから、瓦礫撤去、屋外、屋内の瓦礫撤去、それから、屋内の調査、除染、干渉物撤去、プールの中の瓦礫、プールの上の瓦礫撤去、使用済み燃料の取り出し、こういうものにロボットがいっぱい使われているのですけれども、これってというのは格納容器の全部外での利用になります。

ですから、放射線が極端に高いわけではない。人は長時間は入れられないけれども、絶対に入れられないわけではないと、そういう環境での利用でした。

これが、今からどう変わっていくかといいますと、ちょっと省略いたしますけれども、これから行わなければいけないのは、今度は格納容器の中の詳しい状況ですね、調査、それを

基に燃料のデブリをいよいよ取り出していくと、こちらが今からのフェーズになりまして、格納容器内部での利用というのがポイントになります。

今、幾つかのロボットが内部には入っておりまして、ある程度分かっていることもあるのですが、まず、この圧力容器ですね、この中の燃料が溶け落ちているわけですが、この圧力容器の下の方はどうなっているかというのは、予想はされているのですが、ある程度測定データから予想はされているのですが、まだ見た人はいないというか、見られていないのですね。だから、まだよく分からない。

それから、この地下の部分、この部分も、2号機はカメラを入れて撮影はされていますけれども、細かいところは分かっておりません。また、地下に当たりますけれども、この部分、ちゃんと移動できるのかどうかとか、非常にまだ不明な点がたくさんございます。

こちらは炉内に入った調査ロボットですが、一つは、このピーモルフというロボットなのですが、X-100Bペネという貫通孔がこの格納容器の途中に開いています。ここに直径10センチぐらいのパイプを通して、その中にこのロボットを、細長く一直線になると直径10センチに入るのですが、こちらが入って、中の作業員が歩く床、グレーチングって、こんな金網になっているのですが、そちらに下りて、コの字に変形して、そして走り回って見てくると、こんなことが行われました。これ、1号機ですね。

2号機は、今度は、こちらにX-6Bペネという貫通孔があるのですが、やはり、こちらに10センチぐらいのパイプを通して、そこから、このCRDレールと言いまして、制御棒というのがもともと圧力容器の下にあって、それを上に上げたり、下げたりと、それで核反応を制御するわけですが、その装置の交換レールがあるのですが、こちらから入って中をのぞくと、このためにサソリと呼ばれていますが、こんなロボットが開発をされて入っています。

それから、3号機に関しましては、X-53ペネというのがあるのですが、こちらになるのですが、ここにやっぱり直径15センチぐらいの管を通して、このロボットも直径15センチぐらいなのなのですが、こんな水中ロボットが3号機の中を調べています。

今の調査である程度は分かったのですが、これからいよいよデブリ取り出しに関して何が難しいかというのを最後にちょっとお話をしたいと思います。

まず、これまでと根本的に違うのは、人が絶対に近付けない場所での作業になります。ですから、もちろん、全部遠隔で、しかも、中で故障して止まってしまうと大変ですから、信



頼性が高くなきゃいけないのですね。動かして駄目なら何とか、どうしようっていうわけにはなかなかいかないで、入れる前に徹底的に議論をして、検討して、安全サイドで入れていくと、こんなことが必要になります。

しかも、何年にも及ぶこれから繰り返し作業というのになります。そして、格納容器の内部というのは非常に広くて、広範な三次元空間での移動というものも必要になります。このための工夫というのも大変なものになります。

もう一つが、放射性物質を直接取り扱うということですね。放射線強いので、普通は遮蔽と言って放射線浴びないようにしましょうというわけですが、このデブリ取り出しというのは放射線源をつかんで持ち出してきましたという作業になります。ですから、安全性が非常に強く求められます。

また、バウンダリ確保と言いまして、放射線を漏らさないように、要は、周りに壁を作って、外と遮断した形で全部の作業を行わなくてはならない。また、耐放射線性のカメラとかセンサーにも非常に高いものが要求をされてきます。

このバウンダリ確保、これが非常に大きな一つハードルになります。こちらは先ほど紹介した、全部ロボットなのですが、お話ししましたように、全部直径10センチとか15センチ、非常に狭い穴から入れなければいけない。しかも内部は大体この直径20メートル、この圧力容器の高さとか20メートル、ですから、非常に広い範囲を動かさなければいけません。しかも、線を引っ張りながら、ケーブルを引っ張りながらこの中を全部動かさなくてはならないという非常に難しい、確実に行おうとすると難しいことがこれは要求をされていて、そのためにこんな、一直線になって折れ曲がるみたいな、こんな構造をあえて取っているということになります。こんなところに一つ難しさがあります。

それから、もう一つですけれども、これからいよいよ取り出しをしようとする、単に行って見てくるではなくて、掘ったり、削ったりとしなくてはなりません。そうすると、今、開発がされていたり、計画をされているものがこちらに、これ、2号機ですけれども、2号機のデブリから最初に取り出しましょうということで、実際はかなり出来上がっているロボットになります。

一つは、この折り畳みアーム、イギリスで作られて、今年の7月ですかね、日本に入ったという話ですけれども、このアームをこの中に入れるためにどうしなければいけないかと、ここにさっきのX-6ペネという、60センチぐらいの機器ハッチのある貫通孔があるのですけれども、このロボットを、これ、今、反対向いていますけれども、このエンクロ

ージャーと呼ばれる遮蔽板でできた箱に入れて持ってきて、この60センチの穴に正確につないでやらなくてははいけない。

もちろん、ハッチ開けるときに中の放射線が飛び出すかもしれませんから、ハッチを開ける前にも非常な準備が必要になります。しかも非常に大きくて重たい物を正確に位置決めして止めなければはいけない。ですから、ロボットも大変なのですが、この容器を作って運び込んでここに接続するための技術というのも非常な手間になります。

また、もう一つ、アクセストンネル工法というのを検討されていまして、こちらは、中の機器ですね、機器を出し入れしたり、中のデブリを取り出すためのトンネルになるわけですが、トンネルと言いますか、遮蔽板で覆われた通路ですね、これをここに取り付けましょうというわけですが、こちらは、何と重さが大体800トンぐらいになるということで、これをこちらに持ってきて、やはり、正確に位置を合わせて溶接をすると、こんなことをやらなくてははいけなくて、橋を建設するときの特殊な技術の利用が、今、考えられています。

こちらは、今、お話しした折り畳みアームの動作になりますけれども、これが今年の7月に日本に届きました、コロナで少し遅れていたのですけれども。アーム全体の長さ22メートルと、何でこんな折り畳みの形をしているかということ、先ほどの60センチの穴を通さなきゃはいけないので、ですから、格納したときは折り畳まれて、しかし、動かすときは一直線になると、そんな構造になっております。重さが4.6トンあります。

次、行かせていただきます。

もう一つ、今のは、まずは中を詳細に調査しましょう、少量だけ取り出しましょうということで、今、開発をされているアームなのですが、もう一つ、中で本格的に取り出しましょうということで開発されているアームがあります。

こちらは油圧で動くのですけれども、一直線になって、やはり、レールから中に運ばれてきて、中でデブリを取り出すというものになります。こちらは、これが装置の本体になります。

この大きさの、サイズ感の方を見ていただきたいのですけれども、ここに作業員の方がいらっしゃるんですね。これが人の高さぐらいになります。ですから、これがいかに巨大なものかということが分かるかと思えます。これを一直線上にして、できるだけ小さい穴から中に入れて、レールで中に運んでいってと、こんなことが必要になります。

次ですけれども、最後、ロボット技術の課題ということで、遠隔操作の課題があります。遠隔での作業内容が多岐に渡るということで、ただ、動くだけっていうのは遠隔操作でも簡

単なのですけれども、中で、今度は力を出します、何か物を持ちます、つぎます、双腕で何かを持ち上げますと、バルブ開けますと、こういう作業というのは理論的にはできているのですけれども、実際にロボットで実現をしようとしたときかなりハードルの高い作業になります。できないわけではないのですけれども、かなり実際に使おうと思ったときには工夫が必要になるかと思います。

次、紹介しますが、筋肉ロボットという腕が柔らかいロボットアームがあるのですが、これが非常にいい、この難しさを解決する上で非常にいいアイデアかと思います。

それから、もう一つ、オペレーターへの情報提示、ユーザインタフェースと、例えば、先ほどの長いアームを入れていきます。腕の途中が、実は、建屋のどこかが損傷していてどこかにぶつかります、みたいなときに、ぶつかってしまうと事故になってしまう可能性がありますけれども、そういうときにあらかじめ得られているCADのモデルとか、入れる途中に得られたセンサーの情報を追加してオペレーターに、今、こうなっていますよ、そんなのを提示したりと、こういう情報提示をいかにうまくやるかというのがポイントになってくるかと思います。

こちらが、今、お話しした筋肉ロボットで、いろんなタイプがあります。とにかく腕の部分が柔らかくなっています。こちらはその二つの腕で長い物を持ち上げているところですが、二つの手で物を持つと、持ち上げる、こういう作業は非常にハードルの高い、レベルの高い作業になりますが、柔らかいアームを使うと簡単にできるのですね。

それから、もう一つ、お見せしたいのはバルブを回す作業、これなんかも硬いアームで行おうとすると非常に難易度の高い作業になります。

さて、もう一つが、複雑な大空間での移動の課題ということで、ハードウェアに関する技術、それから、操作系の技術、二つ挙げましたけれども、まず、先ほどの長尺アーム、折り畳みアーム見てもらって分かるかと思いますが、あれは、長い距離を動かした先に行かなければいけないために必要となったアームになります。

こんなふうに動かなきゃいけない範囲が広いというところでもかなり難しいことをやらなくてはいけないというのが分かるかと思います。

中でドローンが使えると検査みたいなものはもっとぐっと簡単になるはずですので、中でドローンが使えるような無線環境みたいなものが構築できると、これから活用が期待できると思っております。

それから、もう一つ、操作系の技術ということで、腕と同じですけれども、中でドローン

飛ばしましょうという、基本的には真っ暗ですから、壁がどこにある、そんなものは全部提示をオペレーターにできるようにならないといけないということです。

そんな中で、一つ、いいアイデアかなと思っているのはこちらになります。

この、ちょっと円柱形していますけれども、こちらのロボットはボート型の調査ロボットでして、1号機のデブリの分布状況を調べたい、知りたいというのが一番の目的なのですが、これも、先ほどの格納容器を真上から見たところで、このCの形をしているのは圧力容器を支えるペDESTALと呼ばれる部分、この中にデブリが溶け落ちています、1号機はこの作業員の出入口から外に漏れ出しているのではないかとされていますが、まだ確認はされていません。

こちらから見に行けばいいのですが、こちら、線量高くて近付けない。ですから、ここに穴を空けて、このボート型ロボットを泳がせたいのですけれども、ひも、ケーブル引っ張っていきますから、途中で引っかかると終わってしまいます。

ですから、まずは、この格納容器に等間隔に空いたジェットデフと呼ばれる、鉄板にリングを取り付けて、1台目はリングを取り付けて帰ってくる。2台目からはこのリングの中を行ったり来たりすることで確実な移動をしようと、そういうものになります。

こちら、すみません、ちょっと時間押しておりまして申し訳ございません。こちら、簡単にポイントのところだけお見せしたいのですけれども、これが本体になります。こんな形で、取付けの近くまで来たら、一つずつリングをはじき飛ばすといいますか、外していきます。

今みたいに外すと、ガイドリングには磁石が付いていて、近付いていくとこの磁石がこの板に張り付くと、これで一つ取付けが終わりましてということになります。

一旦、これが付きますと、2台目からはこんな形でリングの中を通過して目的のところまで移動すると、こんな取組になっております。

こちらはそのロボットを使った、環境を自分で構築しながら進んでいくということで、いいアイデアじゃないかなと思っています。

すみません、最後、デブリ取り出しに向けてということで、まとめになりますけれども、まずは、ロボットはシステムインテグレーション技術であるというお話をしましたけれども、その性能は最新の技術で決まっていきますから、要素技術のレベルが上がれば当然ロボットの性能も置き換えることで上げることが可能になります。ですから、最新技術のチェックが非常に重要です。

それから、ロボットの利用環境の構築ですね。こちらも、どんどん、どんどん、今、いろんなことが分かって、これから分かってくるはずですから、それに応じて構築も進むのではないかと思います。

それから、目標となる開発技術の明確化と書きましたけれども、継続的なモニタリングとその結果に基づく目標設定の更新、1回試してできなかった技術でもほかの人はできるかもしれない。あるいは、世の中にできる技術があるかもしれないということで、こういう情報共有というのにも必要になってきます。

それから、遠隔操縦の技術と、遠隔地での3次元移動、こちらは先ほどちょっと紹介しましたので、省略をさせていただきます。

最後ですけれども、ロボット研究者も廃炉に関しては何か貢献をしたいと思っている人は大勢いらっしゃいます。こちらは今年6月に行われた、日本で一番規模の大きなロボットの学会の講演のタイトルがここに、今、並んでいるのですけれども、これ、うまくいけば利用できるし、利用できないかもしれない。それは、結局、これらの研究が実際の、その格納容器の中の環境で使えるかどうかということに依存して決まってきます。

ただし、もし使えなくても、その情報が研究者にフィードバックされれば新たな研究課題としてそこを解決する技術ということで進んでいくという可能性、期待は十分に持てます。ということで、ロボットの方の要素技術といいますか、そちらには非常に宝の山といいますか、可能性をいっぱい秘めたものがあると思っております。

ですから、未知環境ではありますが、これをいかに調べていくか、それから、焦ることなく継続的にステップ・バイ・ステップで取り組んでいく必要があると。

すみません、大変オーバーしてしましまして申し訳ありません。以上になります。

(上坂委員長) 大隅先生、総合的な動きと廃炉ロボットの紹介、ありがとうございます。

それでは、質疑させていただきます。

それでは、中西先生、お願いします。

(中西委員) どうも、大隅先生、詳しいロボットの開発の状況を御説明くださりましてありがとうございました。非常に御苦労されて開発されていると思うのですが、30年後となりますと、夢のような技術がもしかすると現れるかもしれないなという期待があります。そうしますと、ハードはいろいろ小さかったり、長かったり、いろんなハード的な、筋肉的なものを使ったり、それから、理解できますが、それから、ソフトもその場で判断できるロボットというのも、これもできるだろうなと思うのですが、ただ、一番難しい放射線に対するも

のですね、写真も撮りにくいですし、現時点で難しくても30年後を考えると、もしかすると、例えばですが、日本の技術がもっと発達して中が見られるとか、放射線に対する技術ですね、どうやって中を見るかとか、機械の性能を上げるかとか、そういうのは、今は非常に難しいと思うのですけれども、先生、何か夢のような技術、こういうのってというのがもしございましたら教えていただきたいのですが。

(大隅教授) 分かりました。

基本的には、確かに、30年掛かりますと言われると、今の技術で30年間使い続けるというのは考えにくいのか、よく分からないのですけれども、やはり、最新の新しい要素技術というのが入ってきたら置き換えることによってぐっと何か効率がアップするとか、そういうのは十分に考えられると思います。

そのときに、放射線に対するというところなのですが、基本的には、放射線が強いのは余り変わらないわけですけれども、今、結局放射線に弱い部分というのは、カメラとかセンサーとかなのですね。電子回路の部分は相当強い技術というのがどうもできてきているようです。

カメラも言われているほど駄目じゃないといえますか、やっぱり、多分、中で1,000時間ぐらいは使える、みたいなのは、多分、もう今でもあるのではないかなと思います。

こういうものが更に進化をすれば、もっと長くは使えるわけですけれども、やっぱり、定期的なメンテナンスみたいなものが入ってきますので、それぞれの要素技術が進むというのは、もちろん、効率アップにつながると思いますけれども、ですから、可能性として一つあるのは、今言った電子回りの耐放射線が強くなるというところが一つあるかと思います。

それから、ただし、デブリを取り出すとか、炉の中の構造物を取り出すというのは、基本的には巨大な物を動かしますという技術なわけですね。中の、結局、デブリも何トンありますか、10トンありますかというそういう話に、何十トンって多分あると思うのですけれども、あるいは、中の建屋の構造物で取り出さなきゃいけないものも、多分、何十トン、何百トンという物になってくると思います。

そうすると、どうしても重機のようなイメージのものというのは避けては通れないといえますか、削り出すにしてもエネルギーいっぱいつき込まなくてはいけないので、ですから、そういう物理的にもともとエネルギーのたくさん必要なものを、簡単にヒョイというわけにはなかなかいかないのかなというふうには思います。

あとは、30年、40年とは言われていますけれども、これが100年、200年とかい

うと、また全く違うことを考えましようとなりますけれども、今は本当にまだ中の状況も完全には分かっていませんし、まだ取り出しは、これから始めるところなので何とも言えませんが、作業が少し進むと様子が分かってきて、これも使えるぞとか、もっとここを効率よくしても問題なさそうだ、そういうことも分かってくる可能性がありますので、ですから、あとは、残された時間といたしますか、完成までの苦労と、新しいものを入れることの可能性といたしますか、コストといたしますか、実用可能性といたしますかね、そちらとの兼ね合いになるかなと思っております。

ちょっと、ただ、その夢のような技術というのは、多分、人によって思い描くものは違うと思うのですが、すみません、私はちょっとまだ浮かばないところがございます。申し訳ありません。

(中西委員) どうもありがとうございました。非常に未知な分野への挑戦なので、是非、先生に頑張っていただきたいのですが、一つだけお伺いしたいのですが、先ほど、小さいロボットといたしますか、原子炉の中に入っていくために小さい物を、機械を開発されているとおっしゃった、アクセストンネルというのを、エンクロージャーとアクセストンネルということをお説明になったのですけれども、このアクセストンネルというのは、後で何かボルトを締めるとか、ちょっと私、余り理解できなかったのですが、アクセストンネルのようなものを原子炉に空けるということによろしいのでしょうか。

(大隅教授) まず最初に小さいロボットを入れたのは、中が本当にどうなっているか分からないからなのです。今、まだ格納容器にがあと穴を空けてしまうと、もう中の放射性物質が漏れてしまう可能性がありますので、それを最低限抑えるために非常に細い穴を、パイプを通してロボットを入れるということをしてはいますが、だんだん、例えば、格納容器の外で作業をするわけですが、格納容器の外もこのエリアなら作業ができるとか、どれくらいの時間は大丈夫だとか、いろんな環境が、除染とかをした結果、ある程度整ってきたところがあると思います。

やっぱり、さっきお話ししましたけれども、中の巨大な、大量のものを取り出すのに小さい穴からの出し入れというのは限界があるといえますか、このアクセストンネルというのは、今、工法としてこんなのが付けられると一気に効率は上がる、上げて作業ができる可能性がありますということで、何号機という号機に関わらず使える技術ということで開発がされているものになります。

これができると、今の60センチ径の穴みたいのところよりはもっと大きな開口部が作れ

ますけれども、それでもやっぱり限界はあるといいますか、そんな広い穴にはならないところがございます。

ただ、これから先もずっとこの細かい穴だけ使って出し入れしますというわけではないと、このアクセストンネルというのはもう少し、現実的という表現悪いですが、もう少し実際の取り出しがイメージできるようなサイズのものとして、今、開発が進められていると、そんなイメージでございます。

(中西委員) どうもありがとうございました。是非頑張って、素晴らしいロボットの開発、お願いいたします。

(大隅教授) どうもありがとうございます。

(上坂委員長) 大隅先生、上坂です。幾つか質問させてください。

今日、ビデオで御紹介ありました、イギリス製のデブリ取り出し用のアームですが、これがコロナ禍で製作が遅れましたですね。それで、数か月前、報道ですと、そのためにデブリの取り出しが約1年遅れるのだということでした。

ここで、今日御紹介あったように、事故直後の作業で、国産のロボットでなくアメリカの軍用のPackbotが使われたということで、なぜ、国産が使われないのかという批判がありましたですね。それで、また、それから10年たって、デブリ取り出しがまた外国産に頼るのではないかという心配の声もあります。今日の資料でも大概分かるのですが、これは三菱重工さんと国内メーカーが全体システムを取りまとめている、その一部の大きなアームがイギリス製で、それが納品が遅れたということですよ。取りまとめは日本の企業なのですよ。

(大隅教授) そうですよ。そのとおりです。

(上坂委員長) それで、福島の実験というのは国際共同プロジェクトだと思うのです。その際、こういう日本のグループの企業、それから研究所、大学ですね、それから海外の企業、研究所、大学の、二つの国内チームと国外チーム、これらの、チームワークはうまくいっているのですかね。

(大隅教授) すみません、私は実験の実際の作業の現場にいる人間ではないので詳しいところは分かりませんが、少なくとも一緒に共同開発という形にはもちろんなっていて、無事に運び込まれてきていますので、このプロジェクトに関しては問題ないのではないかなと思っております。

確かに、向こうで開発をして持ってきたわけですが、これからやることというのは



非常にたくさんあって、アームの先にセンサー付けて実際に全部システムとしてちゃんと動くかとか、それから、オペレーターの訓練なんかもこれから必要になってきますし、あと性能ですね、ただ動くじゃなくて、デブリを押し付けたときの力がちゃんと出るかとか、そういうものは全部今からこちらの方でやっていくということになります。

多分、チームワークという点ではこちらがきっちりと出来上がってれば問題なく行われていると考えてよろしいのではないかと思います。

(上坂委員長) それで、先生も言及されましたけれども、燃料デブリは一部非常に大きくて、かつ硬いところもありますよね。先生、掘ったり、削ったりとおっしゃられていたけれども、そのままマジックハンドのようなもので、砂利のように取り出せるものでもないようなところもありますよね。

そうすると、海外の例だと、大きくて硬いところはかなり荒っぽい手法で粉碎して、細かくして取り出したというふうなうわさを聞いております。このあたりどうでしょう。今日のお話は、どちらかというとり出すマジックハンド的なロボットだったと思うのですが、粉碎するには、メカとか、そこは。

(大隅教授) 今、このアームは内部の詳細調査と、試験的取り出しと言って、まずは非常に微量だけ取り出す、たくさん逆に取り出してしまうと、放射線強烈だと後で周りが被曝してしまいますので、非常に微量なものだけまずは取ることを想定しているのですが、同じような構成で、今度は段階的に規模を拡大した取り出しというのがありまして、そこでは中のデブリの性状に合わせて削り出すとか、小石をかき集めるとか、何種類か、あとは床を少し削って掘るとか、何種類かのツールというのが実はもうある程度出来上がっておりまして、そういうものを使って、掘り出す場所に応じてそのツールを付け替えて、それで取り出すということになっています。

そのときに、荒っぽい方法を使うと、格納容器の中ですけれども、やっぱり、ダストが地中にいっぱい出てしまうのですね。そうすると、多分、バウンダリのところで今度は余りよろしくないということで、その辺も考慮した上で掘り出し、削り出しというのがある程度検討されているはずです。

ですから、多分、荒っぽい方法というのは、これから作業がどんどん進んで荒っぽい方法でも平気かもしれないとなったらそちらを利用していくみたいなものは考えられるかと思うのですが、今は一番安全サイドの方、視点から技術開発がされていますので、多分、そういう荒っぽい方法というのはまだないかなと思っています。ただ、今後は状況によって

は可能性はあるかなと思います。

(上坂委員長) そうしますと、大きい塊を粉砕して、安全な方法で細かくして、そしてそれをアームで取り出していくと、そういうシナリオも一応できているということですね。

(大隅教授) ただ、大きい塊と、大きい塊の大きさにもよるのですけれども、余り大きいのを取り出してしまうと、今度は運び出しが大変になってしまうのですね、遮蔽から何から。ですから、多分、そこも、あと臨界の、私もちゃんとは分かっていないですけれども、また臨界の条件になってしまいます、みたいなのが起きないとも限らないようなところもあって、多分取り出しのサイズというのはできるだけ大きくというわけにはいかないようにはなっていると思います。

(上坂委員長) 私も一部研究に関わったことあるのですけれども、直径が、内径20センチぐらい、高さが40センチぐらいの円筒のような容器にデブリ入れる。そして蓋閉めて運び出して、徐々にですね、そういうプロセスだと思う。余り大きいものを、大きな岩を取り出すというのではなくて、そこに入るぐらい細かく粉砕して入れていくんでしょうね。

(大隅教授) そうですね。

(上坂委員長) それで、現段階でも難しいことかもしれませんが、これからの試験取り出しです。今、お話ししたようなことが解決されると今度本格取り出しになるのです。そして、そのあと分析・保管と、いろいろあるのですが、全体のプロセスでのロボット開発の進捗度という、全体を100%とすると何十%ぐらいが今できている感じなのでしょうかね。全体をどうしていくかというのなかなか難しい問題と思うのですけれども。

(大隅教授) 全体は何を100%と考えて、考えればよろしいでしょうか。

(上坂委員長) そうですね、例えば、デブリの取り出しでいきましようか。

(大隅教授) はい、分かりました。例えば、デブリの取り出しの方法を決めたのは、ちゃんと決めたのは2号機だけですね。一応、今、ここに絵でお見せしていますように、まず折り畳みアームを入れて、中を調べて、それから大丈夫そうなら今度はこれで、2年か3年かちゃんと覚えていませんけれども、それくらいで今度は段階的に規模を拡大したと、取り出しと呼ばれていますけれども、そちらで取り出しながら、そこで技術を磨いていくといいますか、これはうまくいくぞとか、これはやめた方がいいぞとか、そういうのを調べて、最後、次に、更なる規模の拡大、この絵で、今映しているスライドでいうと左上のやつですね、これが最終段階で、本格的に取り出すときには入れるロボットになると思うのですけれども、物自身は、ですから、この絵に関しては、下の折り畳みアームは、まずは最初に使う分は、一つは、

1台はできた。上のも1個はできているということになりますけれども、まだまだこれから、それは、今、本当はできるけれども遅れているのではなくて、やはり、ステップ・バイ・ステップという言葉がよく出てきますけれども、まずはやってみて、それから次の本当に必要な技術とか、これでいけるとか、評価ですね、評価をして、それから次が本格的な物が出来上がると、多分そういうふうに進んでいると思いますので、ですから、パーセントとしては非常に低いのかなと思います。

ただし、その低いのは必然的に低いのであって、遅れているという低さとはまたちょっと違うという認識でございます。

(上坂委員長) 事故があって10年たって、そして、いろいろ検討されていて、その大きなロボットアームが入ってきた。一般の方はこれで取り出しが進むのだなとちょっと誤解してしまう可能性がありますよね。

中の放射線レベル高くて人がアクセスできない。しかも、1、2、3号機あって、そして、大量のデブリがあって、状況も違う。まだこれからいっぱい慎重に検討して研究開発やっていかななくてはいけないと。そして、着実に進まなきゃいけないということをしっかりと説明しておかないといけないですね。

(大隅教授) そうですね。

(上坂委員長) 社会に対してもね。

(大隅教授) 今日はデブリ取り出しというところをお話ししましたけれども、廃炉のためには、上の圧力容器、非常に傷んでいて、圧力容器の底にもデブリが少したまっている可能性があるわけですが、それも結局全部取り出していかななくてはいけなくて、ある意味、これは非常に、これだけでも大きいシステムなのですけれども、全体から見ると一部になっている感じのところはあります。

ですから、その中でロボット技術というのがいろんなフェーズで利用されていくというのがこれからの進み方になると思います。

今、遅れているという表現は余り、やっぱり、ある意味、順調には進んでいると私は思っていて、ただし、調べていくことによって、やっぱり、環境が思ったよりも厳しい状況である。

例えば、炉の中ではありませんが、燃料プールからの燃料の取り出しでも、上の瓦礫をただ取ればいいのですという話、そうなのですけれども、そのときにそのプールの上に大きい取り出し用の機械が崩れて落ちていますと、それを下手に引っ張るとガラガラっと今度は瓦

礫が崩れ落ちて中の方を傷つけちゃうかもしれないから、まずはでっかい塊が落ちていたので、まず周りをしっかり調べましょう、持ち上げても大丈夫なようにしましょう、それが確認できてから持ち上げましょうと、こういう作業をやっていくわけですね。

そうすると、最初の予定では取り出すのに何年とっていたのが、調べてみたらプラス1年です、プラス2年ですと、そういう形で延びてしまうというはあるかなと思います。

ですから、格納容器の外に關しての作業は、ある意味、できることは着実に進んでいるというのはそのとおり、そういう認識はございます。

ということで、ですから、あとは、やっぱり、調べながらですよ。一步一步進んでいくしかないかなと。すみません。

(上坂委員長) 冒頭でおっしゃられたように、阪神・淡路大震災や東日本大震災のときに日本製ロボットが使えなかったという批判もありました。今回、福島廃炉のロボット開発につき、今日も非常に多くの開発中ロボットの情報や写真、図を見せていただきました。相当総合化されたロボット開発が行われている印象があります。

そうしますと、この技術を、もちろん福島の廃炉には使っていくのですが、今後の防災とか、非常時にも適用してほしいなと思うのです。そのためには今までの反省があって、どういう課題があるのでしょうか。

(大隅教授) 今回使われたのは、逆に福島のために作られたというよりは、これまでのロボットをここに入れるために改造して入れたという形のものが多いのではないかなと思っております。

一番やっぱりニーズがあるのは、先ほどのQuinceもそうですけれども、建屋の中で利用というよりは瓦礫の上を走って非常に踏破性の高いロボットというのを目指して作られてきたロボットになります。

そうやって踏破性の高い移動ロボットを確実に使えて、安心して使えますよというものが出来上がると、そうするとその展開というのはいろんなところにももちろん見えてくるかなと思っております。

あと何でしたっけ、すみません、あと質問、ごめんなさい。

(上坂委員長) そうですね、今回の開発されたロボットをどう今後有事やら防災のときに役立てるかですね、その道筋ですね。

(大隅教授) そうです、分かります、申し訳ありません。

ハードウェアに關しましては、今言いましたように、確実に動く、いろんな瓦礫、整備さ

れていないような不整地を動けるようなロボットと、こういうものが、安心して使えるものというのが幾つか実績を積んでこの福島で使われて出てくるようになれば、それは実際に使えるロボットとして、認定されればという言い方は変かもしれませんが、皆さんがこれなら使えるぞと、そういう認識ができると、あとは、結局災害現場で使おうと思ったときには、その災害現場に入っていくレスキューの隊員の皆さんとか、実際に作業を行う皆さんが使ってくれるかどうかという話になります。

そのときは、やっぱり、いきなり持って行って使うわけには、そんなことはできませんから、やはり、もともとレスキューの方なりが、隊員がちゃんと常日頃の訓練でそのロボットを前提として、そのロボットの操作法まで訓練して、こんなときは使える、こんなときは使えない、あとは、動かすときのコツみたいなものですね、そういうものも慣れ親しんで、操縦のプロになっていてくれないと、そうじゃないと実際にこれからどんどん展開して使っていくということにはなっていないところがあります。

ですから、災害現場のオペレーションまで含めて、そういうところにロボットが組み込まれていくような仕組みと申しますか、そちらがセットで出来上がっていくということが非常に大事ということになるかと思えます。

(上坂委員長) 福島にはロボットフィールドというのが今建設中ですね。それから、JAEAの室内のロボットのテストフィールドもあります。ですから、今後開発されたロボットを含め、その改良版をそういうロボットフィールドで防災訓練に活用していく。それを定期的に行っていく、いろんなケース変えてですね。そうすると、技術と記憶が伝承されていきますね。

(大隅教授) 福島テストフィールドは、やっぱり、東日本大震災の後に、そういうフィールドの、建物の外で使うフィールドロボットですね、これの下も現物、実際の現場を想定した、今までテストというのはほとんどロボット作ってもやる場所というのがなかったのですけれども、この福島ロボットテストフィールドができたことによって、多分ハードウェアの成熟度と申しますか、完成度というのはぐっと高まっていくのではないかなと思っています。

それから、また、もちろんテストフィールドを使った訓練、トレーニングみたいなものも、多分一部行われているのではないかなと思うのですけれども、そちらもそのような使い方、使われ方によってうまくいくとどんどん進んでいくのではないかなと思っています。期待しております。

(上坂委員長) 冒頭先生おっしゃられた災害対策とか廃炉のロボット技術が日本、ここまで、

少し弱くて使えなかった。今後は使えるようにするために、ロボットを使った防災訓練ですね、そういうことを充実させていくということが重要であることがよく分かりました。

(大隅教授) そのとおりだと思います。

(上坂委員長) それでは、大隅先生、どうもありがとうございました。是非、今後ともどうかよろしくお願いいたします。

(大隅教授) どうもありがとうございました。

(上坂委員長) それでは、議題1は以上になります。

次、議題2について事務局から説明をお願いいたします。

(大隅教授) 私、失礼いたしますね。

(進藤参事官) どうもありがとうございました。

その他でございます。今後の会議予定につきまして御案内いたします。

次回の開催につきましては、8月10日火曜日14時から、場所は8号館6階623会議室、議題については調整中であり、原子力委員会のホームページ等の開催案内をもってお知らせいたします。

(上坂委員長) ありがとうございます。

それでは、中西委員、何か御発言ございますでしょうか。

ないようですので、これで本日の委員会を終了いたします。

ありがとうございました。