

第2回原子力委員会定例会議議事録

1. 日 時 令和7年1月14日（火） 14：00～15：05

2. 場 所 中央合同庁舎第8号館6階623会議室

3. 出席者 原子力委員会

上坂委員長、直井委員、岡田委員、岡嶋参与

内閣府原子力政策担当室

徳増審議官、山之内参事官、武藤参事官

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

副センター長 阿部知子

4. 議 題

(1) 放射線を利用した育種について

(2) その他

5. 審議事項

(上坂委員長) 時間になりましたので、令和7年第2回原子力委員会定例会議を開催いたします。

本日の議題ですが、一つ目が、放射線を利用した育種研究について、二つ目がその他であります。

それでは、事務局から説明をお願いいたします。

(山之内参事官) 一つ目の議題、放射線を利用した育種研究についてでございます。理化学研究所仁科加速器科学研究センター副センター長、阿部知子様から御説明いただき、その後質疑を行う予定でございます。

本件は、原子力利用に関する「基本的考え方」の3の8、原子力利用に係るイノベーション創出に向けた取組に主に関連するものとなります。

それでは、阿部副センター長から御説明をよろしく申し上げます。

(阿部副センター長) 御紹介ありがとうございます。理化学研究所仁科加速器科学研究センタ

ー（仁科センター）の阿部知子です。よろしくお願いいたします。

放射線を用いた育種の特徴といたしまして、1回の照射で多彩な植物が得られるということです。この写真の例のように、赤紫色の小菊品種に一度照射すると、いろんな色の花が咲きます。

次お願いします。育種技術というのはこのように生物の多様性を高めて、その中から目的とするものを選抜するという技術になります。通常最も用いられているのが交配育種といって雄しべと雌しべを交配して両親の良い点を持っているものや両親より優れたものを選ぶという方法。ただし、育種の目的とする形質を持っている植物があれば使えるんですが、それがないときは、世界中を探したり、突然変異育種やゲノム編集などを含む分子育種で作成するということになります。

本日は、突然変異育種の御紹介をいたします。

突然変異育種というのは、変異原を用いて突然変異を効率的に誘発して、育種を促進するという技術になります。変異原としては、化学変異剤と放射線照射などがあり、化学変異剤は安価で非常に処理が容易です。ところが、変異箇所数が多くなるため、変異率は高いんですが、その後、品種にするときに変異箇所が邪魔になるというようなことがあります。

放射線育種は、日本の場合は、世界最大のガンマフィールドのある「放射線育種場」が、ずっとこの学問を先導してまいりましたので、ガンマ線の利用が高いという特徴があります。

イオンに関しましてはどのような歴史があるかと申しますと、1986年に理化学研究所に生物実験も可能な重イオン加速器施設が完成いたします。まず、がん治療の基礎研究が行われますが、1994年から医療用加速器が運転を開始するということが決まっておりましたので、1993年から私たちがイオンビームによる突然変異育種の技術の開発を開始いたしました。

その後、2001年にこの写真に示したとおり、イオンビーム照射により初めての新品種、元の品種は花色がピンクだったんですけども、花卉数が増えて大型化し花色が濃くなり赤っぽい色になったダリア「ワールド」を出すことができました。

次お願いします。「放射線育種場」は、先ほどの繰り返しになりますけれども、世界最大のガンマフィールドが有り、ここが、1960年代から突然変異育種学において世界的に中心的な役割を担ってまいりました。そのため、日本は中国に次いで突然変異育種の品種数が多い国になります。

また、共同利用施設を併設して、国立大学の基礎研究や応用研究に使用するということと、

それから広く産学官から共同研究、依頼照射も受けておりました。

品種としましては、「二十世紀ナシ」に耐病性を付与した「ゴールド二十世紀」、酒造用に適した「美山錦」や「エルジーシー潤」などたくさんの多様なイネ品種ができております。

ところが、2022年に全ての施設で放射線照射業務を終了いたしました。

次お願いいたします。2000年を境にして、その前とその後の変異原、どういう変異原を利用したかということグラフにしました。これは直接利用と申しまして、照射したそのものが品種になったものの数を示しております。そうしますと、2000年より以前ですと、やはりガンマフィールドが活発に活動しておりましたのでガンマ線利用が高いんですけども、2000年を契機に割合というのはガンマ線の割合が減って、イオンビームとかX線の割合が増えてまいりました。

次お願いいたします。産業利用に取り組む加速器施設というのも現在増えておまして、先ほどちょっと申し上げましたけれども、医学ではイオンビームを粒子線と呼びがん治療に使っております。その施設は国内に既に26か所ありまして、この日本地図では陽子線をピンク色、重粒子線、主に炭素線なんですけれども、それらを使える病院を青色に塗ってあります。これらの施設は事情が許せば、育種利用も可能です。また、品種改良に実際に使っている加速器がある県というのは緑色に塗ってあります。そうしますとこのような分布になっておまして、福井県にある若狭湾エネルギー研究センター、群馬県にある量研機構の高崎量子技術基盤研究所、それから私が属しております埼玉県にある理化学研究所仁科加速器科学研究センターの3か所。

それから、中性子線に関しまして、茨城県にあるJ-PARKセンターが、X線は放射光なんですけれども、佐賀県にある九州シンクログラフ研究センターが、それぞれ品種改良研究に実験時間を配分しております。

イオンビームの品種改良への利用は、日本発の新技术でございまして、だんだん世界にも普及しているという状態でございます。

次お願いします。仁科センターにあるイオンビームの加速器施設ですけれども、RIBF（RIB Factory）といいます。世界中の核物理学者が集う原子核の構造や性質を研究するための施設で、5台のサイクロトロンを用いてウランイオンを高速の70%のスピードで加速することが可能です。

一番重い、加速器で一番大きなサイクロトロンというのは、この上にありますピンク色のなんですけれども、8,300トンの超伝導リングサイクロトロン（SRC）です。

育種にはAVFサイクロトロン（AVF）と理研リングサイクロトロン（RRC）と中間段リングサイクロトロン（IRC）の三台を用いております。

次をお願いします。どんな材料に当てているかということ、乾燥種子や吸水種子や培養細胞や穂木などです。材料はチャック付き袋、シャーレ、角型プラスチックケースなどに入れて、それぞれの容器に専用のフレームに容器を設置して、容易に当てれるようにしています。

穂木とか形が不定形のものは袋に入れて板にテープで貼っていたんですけども、最近はカセットという小さなケースを作って、そこに穂木などを入れられるようにして、ビニールテープでとめなくていいようにエコ化しています。

この生物自動照射装置は、フレームを設置する自動試料交換装置とレンジシフターから構成されます。レンジシフターというのは、さまざまな厚さのアルミ板を通過させることでエネルギーを減衰し、線エネルギー付与（Linear Energy Transfer）LETを調整するという装置になります。

次をお願いします。イオンビームは何かということ、原子から電子をはぎ取って、陽子と中性子からなる原子核を加速したものです。RIBFで生物照射に用いているイオンビームをLETの大きさにイメージしますと、例えば炭素は卓球のボール、ネオンはテニスボール、アルゴンはサッカーボールで、鉄はボーリングのボールぐらいの大きさのイメージになります。

次をお願いします。変異誘発に与える物理の要因としましては大きな要因は二つありまして、線量と線エネルギー付与です。線量は物質に吸収されたエネルギー量なんですけれども、線エネルギー付与、LETは飛程に沿って単位長さ当たりに物質に付与するエネルギー量になります。イオンビームはこの二つを変えて二次元で調整して変異に対する最適化を行うことができるというのが特徴になります。

RIBFで生物学に用いられているLETはここで示したとおり、炭素、ネオン、アルゴン、鉄で、LET23から4,000キロエレクトロンボルトパーマイクロメートルぐらいのものをを用いております。

それに対してX線はどのぐらいかということ、LETは2.5キロエレクトロンボルトパーマイクロ、コバルト60のガンマ線については0.3キロエレクトロンボルトパーマイクロメートルとなり、この二つの変異原はLETが非常に小さいということになります。

次をお願いします。我々は先行しておりました従来方法であるガンマ線とそれからイオンビームにどんな違いがあるかということを中心に研究を進めてまいりました。繰り返しになり

ますけれども、ガンマ線ですと可変できるのは線量だけ、イオンビームの方は線量とLETを変えることができます。

そして、作用としては、ガンマ線は間接的にラジカルが発生して、DNAの一本鎖を切断します。イオンビームは、ビームがDNAの近くを通れば直接DNAの二本鎖を切断します。その作用によって、ガンマ線の方は塩基置換とか1ないし数塩基の小さな欠失、あとまれに多重切断によって大欠失とか染色体再編成が起こります。イオンビームは、数十塩基の小欠失や数百キロ塩基の大欠失、染色体再編成などが起こっております。

変異率を比較すると、イオンビームの方が高いということも分かりました。

さらに、変異体の選抜は、ガンマ線とかX線はこれまで半分死んでしまう高線量で行っていたんですけれども、イオンビームに関しましては生存率に影響のない低線量で変異体を選抜することができます。

ただ、使える施設が限定されるということと、それからスケジュールは大体半年から1年前に何日の何時からということが固定されるということと、加速器運転の電気代が高いというのが欠点になるかと思えます。

次お願いいたします。結局何が起こっているのかというと、細胞の中にはDNAがパックされて入っております細胞核があります。細胞核をイオンビームが通過して、その飛跡にDNAがあると二本鎖を切断します。細胞は二本鎖が切断されるとそのまま死んでしまいますので、植物自らが持っている修復力を使ってDNAを修復いたします。正しく直されると問題がないんですけれども、修復を間違えると、その結果、遺伝子が働かなくなってしまう形質が変化します。それによって花色が変わったり大きな植物ができたりします。このDNA修復の間違いを利用するという原理は、自然突然変異と同じということになります。

次お願いします。この表は、種子よりも栄養繁殖系に照射する方が高い変異率を示しております。栄養繁殖系とは何かというと、挿し木や接ぎ木をする挿し穂、あとは培養細胞などがそれに当たります。

こちらが最初の新品種育成例。ダリアなんですけれども、もとの品種の花色はピンク色だったんですけれども、変異体では花色がいろんなピンク色となったり、白い模様が花卉に入ったりして、また、ここの○で示しました赤くなり花卉数が増えて大きくなったのが、新品種「ワールド」でございます。

このときの変異率というのは、線量によって変わりますが、20.3%から半分の個体で花色が変わったり、花卉の数が増えたり減ったり、花の形が変わったりするという高い変異

率を示しました。

バラも高い変異率を示しまして、品種によるんですけども、3. 1%から半分ぐらい、花色や花卉の数が増えたり減ったりというものも含めましていろいろな変異が得られております。

これらのような変異体を用いて、理研では植物で40の新品種と、それから3株の酵母を現在まで市場に出しております。

以上のように重イオンビーム変異技術の特徴をまとめますと、低線量で変異率が高いです。生存率が低下しない線量域で変異体を選抜できます。あと、ゲノム当たりの変異遺伝子数は少ないなどの特徴が現在までに分かっております。

次お願いします。重イオンビームはLETが変えられるということが分かりましたので、このLETの効果というのに私たちは非常に興味がありました。これは動物の細胞核に重イオンビームを通した写真になります。赤い部分はDNAが染まっています。この黄色い点のところは、DNAの二本鎖切断があるがピカピカ光るようにしております。そうすると、炭素、LET30ぐらいですと直せない場所というのがトントンぐらいなんですけれども、LETが60になりますとここをイオンが通過したよねというのが分かるぐらいトントントントと真っ直ぐ続いております。LET300のアルゴンになりますと、もう飛程に沿ってかなり太い領域で直せない部分が残るといようなことが分かりました。

以上のことから、イオンビームは細胞核を直進して、飛程に沿って局所的にエネルギーを落としているということが観察できます。そして、炭素<ネオン<アルゴンと重いイオンになるほどDNAの修復が難しくなるということが示されました。

そこで、我々は、変異誘発に適したLETやイオンの種類があるかということと、それからLETが高くなる重いイオンや遅いイオン照射では、DNA破壊領域が大きくなるかということをも明らかにするために研究を進めました。

次お願いします。モデル植物として、栽培が容易で、世代交代が速くてゲノムサイズが小さくてDNAの全配列が解明している、シロイヌナズナを用いて研究を行っております。乾燥種子に照射して、それから発芽した植物体M₁植物といいますけれども、その生存率を測定します。2か月待つと子供の種、M₂種子が取れます。M₂種子を収穫して播種してM₂植物を育てて、今度はアルビノといって葉が白くなるものを観察して変異率を出します。

それと同時に、これまで既知で遺伝子がよく分かっている形態変異体、例えばここに示しましたのはhyといって下胚軸が長くなるもの、それからg1というのは、シロイヌナズナ

は葉に毛があるのですが、その毛がないものなどを選抜いたしました。

変異体の原因遺伝子を明らかにするという研究を行うと共に、次の世代の種子も取って、 M_3 世代で、変異形質が安定していた変異個体を用いて全ゲノム解析を行うという実験を行っております。

次お願いいたします。これがシロイヌナズナの M_1 の生存率と M_2 のアルビノの変異率を示したものになります。まず、生存率ですけれども、線量が上がってくると下がります。我々は、この急激に生存率が下がる所を「生存率の肩」と呼んでおまして、ここのグラフでは星印で示してあります。そうしますと、LETが低い窒素ですとこの線量域内に「生存率の肩」はないんですけれども、LETが上がってきますと、LET 60だと250グレイ、LETが290だと50グレイというように、LETが高くなると低線量で「生存率の肩」が現れるというようなことが分かりました。

次に、アルビノの出現率を見ていただきたいんですけれども、LET 30の窒素ですと250グレイでアルビノの出現率が高くなって、ネオンですと150Gyでアルビノの出現率が高くなって、アルゴンだと50グレイでアルビノの出現率が高くなっております。

それを生存率のグラフの方に矢印で表しますとこのようになって、「生存率の肩」、若しくは「生存率の肩」よりも低い線量で変異率が高くなるということがこれで示されました。

ここではLETによるのかそれともイオンの種類によって変異率が支配されているのかということが分かりませんでしたので、いろいろなイオンでLETを変えて照射して、変異誘発に影響を与えるのはイオンの種類かLETかということ进行调查いたしました。

次をお願いいたします。これはそれぞれの核種をそれぞれのLETに調整して、そのときに最も変異率が高かった線量での変異率、アルビノの出現率を示してあります。そうすると、LET 23、30、62、290、640と比較いたしますと、LET 30が最も変異率が高いということが分かりました。我々この変異率が高いLETをLETmaxと命名いたしました。

シロイヌナズナだけじゃなくて。イネ、ソバ、コムギでもLETmaxを観察すると、植物種によってLETmaxは異なっておりまして、シロイヌナズナですと30でしたが、イネでは23～50、ソバでは23～40、コムギでは50～70がLETmaxであるというようなことが分かっております。

ただし、最も低線量で致死効果が高いのはLET 290で、これに関しましてはシロイヌナズナ、イネ、ソバ、小麦、いずれも共通しておりまして、今のところ、致死効果が最も高

いのはLETは290であり、これは植物で共通なのではないかと考えております。

次お願いします。先ほどの図は、アルビノの出現率を変異率といたしましたが、先に示したような形態変異体も選抜しておりましたので、形態変異体の選抜に関してLETmaxがあるかということはこの表で示しました。

こうしますと、やはり形態変異体につきましても、LET30すなわちLETmaxの出現率が最も高く、LETが低くても高くても変異率は低いということが分かりました。

これらの変異体は昔から選抜されておりました、化学変異剤処理やX線照射の変異率は既に報告されていたんですけれども、イオンビームをLETmaxで照射すると、変異率は化学変異剤EMS (Ethyl methanesulfonate) 並みに高くなるということが示されました。

次お願いします。このときまではシロイヌナズナを1,000とか1万個とか栽培して、既知の形態変異体を選択して、PCRしてシーケンスして原因遺伝子の変異箇所を同定するというを行っておりました。それだと安いんですけれども、変異体選抜までが大変なんです。2015年から全ゲノムシーケンスの価格破壊が起こっておりまして、この表は2016年の比較なんですけれども、100万円していたものが20万円できるようになって、現在は2.5万円ぐらいでできるようになっておりますので、全ゲノム解析というのが非常に身近に使える技術になってまいりました。

次お願いいたします。サンプルから抽出したDNAをゲノムシーケンスを実施する先に渡すと、断片化、ライブラリ化、シーケンス、情報解析まで実施して、解析データだけが返ってくるという方法もあるんですけれども、イオンビーム照射では、小さな変異だけではなく、大欠失や染色体再編成のようなダイナミックな変異が起こりますので、普通のソフトだと抽出されない可能性がありましたので、まず変異検出パイプラインというのを作りました。それに伴って、ラボで断片化、ライブラリ化、それから情報解析をするということにして、シーケンスだけを外注するという形にいたしました。そうすると、1.5か月でデータが返ってきて、理研にあるスパコンを使うと二日ぐらいで変異検出ができましたので、非常に早く研究を進めることができるようになりました。

例えば、この下にあるのがシロイヌナズナの365-as1系統という変異体で、葉が変な形をしている、こんな小さい植物なんですけれども、ちゃんと種子をつけます。これの全ゲノム解析をしてみたら、なんと5本ある全ての染色体で染色体再構成が生じていました。このように染色体が切れて、その断片が別の染色体に組み変わったりする複雑な変異を起こしているということが分かりました。

現在もなんですけれども、ここで染色体が切断しているようだというのは教えてくれるんですけれども、どことどこが引っついてるよということは示してくれない。いまだに目で確認しながら、こことここが引っついてるねというパズルを解いております。

これは、ポストイットにDNA配列を書いて、こことここが引っついてるのではと候補をあげて、2週間後にすべてがつながってパズルが解けたとき、担当の若手研究員二人の嬉しそうな顔を撮った写真になります。

こんなふうにして、全ゲノム解析を用いて染色体がどのように変わっているかという解析が容易にできるような時代になってまいりました。

次お願いします。そうすると、ガンマ線とか中性子線とかほかの放射線と比較するということが容易になります。こちらはガンマ線、中性子線、LETmaxの炭素線、LET107の炭素線、LET290のアルゴンイオンのそれぞれの変異誘発のときに最適な線量で照射した変異体を全ゲノム解析で解析したもののデータになります。遺伝子領域に発生した変異箇所数と変異の種類を調査し、その割合を示しました。

そうしますと、このようにガンマ線、中性子線、炭素イオンでは、点変異や小欠失、挿入などの小さな変異がメインになりますが、炭素イオンでは、中性子線やガンマ線では発生しにくかった100塩基以上の大きな欠失や染色体再構成が発生することが示されました。

また、LET290、最も致死効果の高いアルゴンにおきましては、小さな変異のは割合が減って、大欠失とか染色体再編成の割合が非常に高くなるということが分かりました。

いずれにおきまして、1変異体当たりの変異遺伝子数というのは10個前後でございまして、これだと変異体の原因遺伝子を同定するのは容易であろうということが考えられました。

次お願いします。これらは変異体を用いて新しい遺伝子機能を決定した例の表になります。イネ、ヒトツブコムギ、ソバ、ヒロハノマンテマ、シロイヌナズナ、トレニア、シダなどいろいろな植物でいろいろな遺伝子の同定が行われております。

表は、遺伝子には点変異とか1から数塩基の小欠失もありますが、大欠失の割合が高く、新しい遺伝子の機能を知るためには大欠失変異が有効であることを示しております。

次お願いします。このように、LETの違いを利用してユーザーが欲しい変異を誘発するというので、「テーラーメイド品種改良技術」を、現在我々は推進しております。LET30とか60の比較的LETの小さいイオンビームにおきましては変異率が高くて、変異箇所

所数は多い、小さな変異が誘発されます。小さな変異、すなわち点変異や小欠失、これらは1遺伝子を破壊するには十分ですので、これらのLETは品種改良に適していたり、新しい遺伝子を探すときの変異体を得るのにも適しております。

それに対してLET180以上のアルゴンとか650の鉄に関しましては、変異率は低くなります。変異箇所数は少なく、誘発される変異は大きくなって、大欠失だったり染色体再編成だったりします。これらで期待されるのは、例えば大欠失は、重要な遺伝子というのがタンデムに並んでいることが多かったりしますので、タンデムに並んでいる複数の遺伝子を破壊できることによって、または、染色体再構成は重複や転座によって、今まで出現しにくかった変異を得ることができるんじゃないかなどということが期待されます。

植物の品種改良に関してはこうなんですけれども、微生物に関しましては、軽いイオンを当ててもほとんど点変異で、多くは正しく修復されてしまいます。ただし、アルゴンとか鉄、LETさらに高いイオンビームを当てると、微生物でも欠失変異が誘発されますので、微生物に関しましてはアルゴン又は鉄の照射を現在奨励しております。

次のスライドをお願いします。私たちイオン育種研究開発室は、変異誘発技術の開発と、それからモデル植物を用いた新しい遺伝子の機能を知るということに集中して研究を行っております。品種改良自体はそれぞれの植物に情熱を持っている品種改良ユーザー会の方々にお願いしております。それらの人々は新しい品種を作ったり、自分たちが目的とする新しい遺伝子の機能を知るということを行うために重イオンビームの変異誘発技術を利用しております。

品種改良ユーザー会は、1998年に国内24団体で始まったんですけれども、現在大体国内、国外合わせて200団体がユーザー会に所属しております。どんなグループかと申し上げますと、企業と生産農家、それから農業試験場、それから大学などの教育機関が1対1対1の割合でそれぞれの知恵を出し合いながら品種改良研究を推進するということを目指しております。2年に1回ユーザー会を行って、研究者間の交流を促進しております。

品種改良や有用株の育成というのは品種改良ユーザー会が担当しておりまして、その後自社で製品にするか加工をするかなどなど、全てユーザー会に任せております。

次お願いいたします。これはバーベナという花の成功例なんですけれども、花手毬サクラというのと花手毬コーラルピンクという品種にLET30の窒素イオンを照射いたしました。照射対象は培養体で、一つの節から2か所の再分化する芽を持っております。したがって、15本の培養体に当てると30の再分化体が得られるはずなんですけれども、例えばサクラ

のコントロールでは24でしたので、再分化率というのは80%となります。

それぞれこのようになっておりまして、繰り返しになりますけれども、再分化度が低下しないところで変異体が得られております。サクラは5グレイで不稔の変異体が、コーラルピンクは5と10グレイで不稔の変異体を得られており、100サンプル照射したら数個程度の目的とする変異体を得られるということになります。

この変異体はどういう特徴だったかと申しますと、種子ができないようにした不稔の変異体になります。上の色が塗ってある方が変異体で、白丸の方が元品種になります。そうすると、どちらも最初の花はたくさん咲くんですけども、種子をつける方は種子をつけるのにエネルギーを使いますので、次のピークが現れず減ってしまう。すなわち、1回目咲いた後、次のピークが減ってしまいます。それに対して種子をつけない方は、次の花の時期までに2ヶ月たっているので葉や茎の数も増えて、株が大きくなりますから、花の数も増えて、長い間たくさん花が咲くというような特徴があります。

次お願いします。このほかに現在どんなものが注目されているかといいますと、ヒノキとかスギとかは花粉症が問題になりますので、成長が早くて材木に適していて花粉が飛ばないというような夢のような樹木はできないかということで、材木育種センターにスギ1,184本とヒノキ610本を現在育てております。まだ花は咲いておりませんが、楽しみに待っているところです。

それから、海藻類の育種に、現在、力を入れております。海藻が固定するCO₂はブルーカーボンとして注目されております。ノリでは、赤潮で色が悪くなるというのが問題でしたので、最初から色が濃いものを養殖したらどうだろうかということで、色が濃いノリを選抜しましたところ、養殖したら結構収量も良いよというようなことが分かりました。ワカメでも成長が早いものを選抜しております。

あとは、ワムシというのは動物性プランクトンなんですけれども、メスがクローンで増えるというものです。なので、交配を経ないので変異体は比較的楽に得ることができて、小さい200マイクロメートルぐらいのものだったんですけども、400マイクロメートルぐらい大きくなるというものを得ることができました。これはマグロとか大型になる魚の最初に与える餌になります。最初に与える餌なので、長いこと与えてあげた方が仔魚の生存率が高くなるんじゃないかということを狙って大きいものを作りました。

そのほかに、微細藻類は油を生産するというので注目を浴びているんですけども、そのバイオ燃料を作るためのユーグレナ、クロレラなどにおきましては、オイルの生産性が高

いものを選抜できております。

それから一番右の写真に赤い点々が見れるんですけども、これは高カルテノイド生産株で、ヘマトコッカスというものから選抜したんですけども、アスタキサンチンというと女性に分かるかと思うんですけども、化粧品に入っている赤い色素の生産性が非常に高いものが取れたという例になります。

次お願いします。最近海藻類に力を入れていると申し上げましたが、その中の一つにコンブがあります。特に去年海水温が非常に上がって、ワカメもコンブも生産量が減って非常に問題になったんですけども、それより前から日本周辺の海温が上がっているというのは問題になっておりました。天然の中から種苗を探してくるんですけども、いつも取っていたところで種苗がないというような状態になっておまして、非常にシリアスな状態になっております。

じゃあ、高い海水温でも育つコンブを作ろうということで、北海道大学と共同研究を開始しました。2022年に照射して海で養殖して、2023年に大きく育つものがあり、大きく育つものを取っておこうねとって選抜しました。その子供を昨年度2023年9月からまた養殖を開始いたしました。そのときはそんなに意識してなかったんですけども、この年は非常に海水温が高くて、5度以上高かったりしたので、もうちょっと待って海水温が下がってから養殖したらとは思ったんですけども、長い期間養殖すると大きくなるので、やはりスタートはこの時期ということで開始いたしました。

その後、こちらのグラフの赤い線、1月と2月の赤い線を見てほしいんですけども、コンブが一番育つときも海水温が高くて、下手すると平年の5度ぐらい高くて、この間にほとんどのコンブは溶けてなくなってしまう、養殖ロープから消えてしまうというようなことが起こりました。その中でも我々が最初に選択した大きくなるコンブは、この写真に示しましたとおり、現地の方々が喜んでくれるぐらい立派に良い形に育ちまして、これは多分高温耐性を持っているだろうと、現在期待しております。

次お願いいたします。品種改良は我々のおいしいものを食べたいという希望の実現や、食べるのにこにこするということで、世界平和に貢献すると私は信じております。

現在、我々は耐塩性の稲や小麦など選抜しておまして、海水で育つような作物の栽培を実現すると共に、その根圏には魚が集まってきて、卵を産んだり小さい魚が育つなんていうようなことができれば面白いなと「海洋農場&お魚養殖場」を夢を見ております。

次、最後になりますけれども、本技術に興味を持っていただいた方は、来週の木曜日と金

曜日に、先ほどご紹介いたしました品種改良ユーザー会を開催いたしますので、是非和光にあります理化学研究所までお越しください。

以上です。

(上坂委員長) 阿部様、説明ありがとうございます。

それでは、質疑を行いたいと存じます。

それでは、直井委員からお願いします。

(直井委員) どうも阿部様、御説明ありがとうございます。

日本発の技術であるこのイオンビームを使った育種研究技術開発、これを長期にわたって牽引されてこられて、またお花の品種改良ですとか、吟醸香の高い清酒酵母を作って吟醸酒「仁科誉」を造ったり、温州みかんの「春しずか」など多くの商品を世に出されてきたことに対して敬意を表したいと思います。

幾つか教えていただきたいのですが、まず4ページ、この中で2000年代以降ガンマ線の利用がかなり減ってきて、それに取って代わってイオンビームが利用されるようになってきているのだと思います。恐らくはイオンビームの方がいろんな成果が、メリットが大きいというようなこともあってガンマ線が減ってきたんだと思うのですが、それでも依然としてガンマ線の利用がイオンビームと同じぐらいある。この背景としては、ガンマフィールドが2022年までは動いていたわけで、それが理由なのか、今後の見通しとして、イオンビームが主流になっていくのかガンマ線が残り続けるのか、その辺り教えていただけないかなと思います。

(阿部副センター長) イオンビームは先ほど申し上げたとおり、スケジュールが非常にタイトなんですね。いつでも、今日当ててということはできなくて、例えば来月の何日に当ててというのもできない。大体半年前には何月何日の何時から何時の間に当ててくださいということになってるので、ちょっと使いにくいんですね。ガンマ線は比較的いつでも当てれたりするので。

それとあと、世界的に見ると、やはりガンマフィールドを持つてる国というのは多くて、まだガンマ線が主流だと思います。

(直井委員) ありがとうございます。

それから、5ページ目にこのイオンビームが活用されるいろいろな植物の品種改良だとかに使われるセンターを幾つか教えていただきましたけれども、需要と供給のバランスからいうと、現状のニーズにこの施設が対応しきれているのか、逆にやはりちょっと足りないよう

な状況なのか、そこら辺のところを教えてくださいませんか。

(阿部副センター長) どちらかという、電気代が高いというのが律速になっておりまして、やはりちょっと足りないんじゃないかなと思います。実は近くにあった方が、例えば先ほど言いました穂木とかに当てる場合、やはり乾燥を嫌ってしまいますので、かといって水分が多かったり暑すぎたりするとツケモノになっちゃうわけですね、植物が。だから、近くにあつて、持って行って持って帰れるというようなところが理想だと思うので、もう少し増えるといいかなと思っております。

(直井委員) ありがとうございます。

それから、LETを精密に制御して、更にゲノム編集技術が進展してきて、かなり高度なコントロールができるような状態になっていることがよく分かったのですが、一方で、大きなLETのもので、これも今まで出現しなかったような変異の可能性もあって楽しみな世界じゃないかなと思ったのですが、例えば25ページの注目の有用変異体の中では、いわゆる高LETのイオンビームを当てている事例というのはこの中にあるのでしょうか。

(阿部副センター長) はい、ワカメとワムシはアルゴンでいいものが取れております。

(直井委員) そういうことですね。

(阿部副センター長) あと、クロレラとか下の欄の微細藻類は結構重いイオンを当てて面白い結果になっています。

(直井委員) ありがとうございます。

最後の質問ですが、23ページで御説明いただいた品種改良ユーザー会、これは恐らく品種改良のニーズを実用化に結び付ける重要な役割を果たしているんだろうと思うのですが、この事務局を理研のイオン育種研究開発室が担当されていると。

(阿部副センター長) はい、そうです。

(直井委員) そういうことですね。

それで、特にこの品種改良については商品化以降は商売になってくるので、品種改良のときのいわゆる研究開発計画みたいなどころから成果が得られたときの扱いはどういうふうになっているのか、パテントの扱いとかですね、差し支えない範囲で教えてくださいませんか。

(阿部副センター長) 共同研究でやっておりまして、新品種に関しては理化学研究所が権利を主張するという形になっております。

ウハウハなのかなと誤解があるといけないのでちょっと加えますと、地方農業試験場が新

品種を作った場合、その権利は県内に無償で与えてしまう、だからそういうときは貢献はしたけど理研に収入はないねというようなことが発生いたします。

酵母は埼玉県に無料で配布しております。

(直井委員) ありがとうございます。私からは以上です。

(上坂委員長) それでは、岡田委員、お願いいたします。

(岡田委員) 阿部様、御説明ありがとうございます。

私の方から、3ページの方で、1960年から突然変異育種の中心的役割を日本が担っていたけれども、中国では突然変異育種の品種が多いという、やはりこれはガンマ線フィールドみたいなものを持っているのでしょうか。

(阿部副センター長) そうです、ガンマ照射施設が広く普及しています。

(岡田委員) 先ほどのイオンビームというのもやられているのですか。

(阿部副センター長) 中国は既に品種改良を実施している重イオン加速器施設があり、新品種も育成してます。今年度か来年度に更に大きな施設が運転を開始する予定です。

(岡田委員) これはどういう背景なのですか、中国がそういう品種を改良するというのは。

(阿部副センター長) 中国は、やはり食用作物が主流で、広域適応性や耐病性も含め、最終的に収量増を狙っているものが主流ですが、バラやキクなど花の育種も、実施しています。

(岡田委員) 分かりました。私は中国の大豆の分析をしたことがあって、すごくセレンが少ないという土地があって、中国の大豆は余り栄養価が高くないという話で、中国は土地が広いだけあって、土地が持っている栄養もいろいろで、それにあつた品種を作っていかなければならないと思いました。

(阿部副センター長) そのとおりだと思います。

(岡田委員) それと、先生にちょっと御意見をお聞きしたいのですけれども、日本は今地球全体が温暖化していますよね。温暖化して、私は北海道出身ですけれども、先ほどのコンブにしても温暖化によっていろいろな被害があるということになりますと、今後先生の方で温暖化に対応するような品種改革というのですか、品種を作るということについてはどうお考えでしょうか。

(阿部副センター長) 既に取り組んでおりまして、例えば、高温に強いキク。夏の高温にあつたキクは異常花、形がちょっと悪くなってしまうんですけれども、その出現率が低いものを選抜したり。あと、サクラは低温に長い時間さらされると花が咲かないんですけれども、低温にあわなくても咲くサクラができたりとか。そういうふうにもいろいろ工夫をしながら対

応できる品種を作ろうという活動をしております。

あとは、変異集団を保存していますので、その中から次に必要なものを選抜するという体制も整えつつあります。

(岡田委員) ありがとうございます。

是非放射線の利用ということに関してもそうですけれども、今の日本に有用な、世界でも有用な技術なのだということを今後発信していきたいと思っておりますので、どうかよろしく願いいたします。

(阿部副センター長) こちらこそよろしく願いいたします。

(岡田委員) 以上です。

(上坂委員長) それでは、岡嶋参与からも専門的な観点から御意見を頂ければと思います。よろしく願います。

(岡嶋参与) どうも御説明ありがとうございました。非常にいろんな面で利用されているというのがよく分かったんですけれども。

一つお伺いしたいのは、こういうふうには育種という形で放射線を当てて、ある意味変異をさせてというようなことなのですが、今日のお話では今やゲノム解析によりどこの箇所が変異したとこのことを確認されているということです。たとえば、放射線を当てる前にこういうような種類のものが出来上がるだろうとかという予測的なことを、今だとシミュレーションできるように思うのですが、そういうようなことはどうなんでしょうか。今日のお話ではその辺がなかったと思うんですが。

(阿部副センター長) お花に関しては、スタートをこの色の花を使うとこんな変異の花の色が出ますということがほぼ分かっております。

あとは、例えば植物によっては同じ遺伝子を幾つもコピー持っていたりするんですけれども、そういうのをチェックして、コピー数の少ない材料を使えばより早く目標に到達するというような、そういう予想をするという技術も進んでおります。

(岡嶋参与) そういうことですか。多分そういうものがないと、絞り込みがなかなか大変で、出来上がりが単に本当にさいころを振っているような状況だと大変だなと思った次第です。

(阿部副センター長) だから、ユーザー会に大学の先生がいるというのは意味が大きくて、先生方が割とそういうところを担当して、当たらない箱から当たりはでないの、なるべくたくさんの当たりを入れておく、そういう技術を研究しております。

(岡嶋参与) そういう分野は今我が国は世界的な中ではどうなんでしょう。

(阿部副センター長) 進んでると思います。もともと育種って非常に繊細で、私たちって味にもうるさいので、食用作物の育種に向いているというか、育種は最先端なんだろうと思っています。花色なんかに関しても非常に繊細に調整しているので、技術としては最先端。

(岡嶋参与) 分かりました。そういう点は非常にいいんだなと思います。そういうお花とかというのではこういうのがものすごく発達するというのも分かる、受け入れやすいということもあるだろうと思います。反面、今現在ではないですけども、かつて例えばジャガイモの発芽防止のためのガンマ線をというところで、照射したジャガイモは危険なので食べないというような誤った考え方があったかと思うのですが、そういうような誤解というか一般の方々の育種に対する理解という点ではいかがなんでしょうか。

(阿部副センター長) 有名なところでは、重イオンビームでカドミウムを吸わないという「コシヒカリ」ができましたので、それを用いてそれぞれの県の品種にカドミウムを吸わないという形質を入れようということで交配してるんです。一番最初にできたのが「あきたこまち」で、それを全部入れ替えるということを秋田県が発表したらすごい反対のご意見が出てきました。誤解も多かったんですけども、育種学会がコメントを発表いたしまして、これは合ってるこれは間違ってるというのを分析、安全性を説明したので、それからは余りないような気がしています。

(岡嶋参与) やはりそういうのは我が国だからこその状況ということでしょうか。

(阿部副センター長) そうだと思います。新しい技術が嫌というのはやはりどなたも感じることはあると思うので、その点は丁寧に説明していくしかないなと思っております。誤解がないように。

(岡嶋参与) 分かりました。そういう普及活動といいますか、その点のところでの知識の普及ということもされているというようなことですね。

(阿部副センター長) はい。

(岡嶋参与) 分かりました。どうもありがとうございました。

私からは以上です。

(上坂委員長) では、上坂から意見述べさせていただきます。

まず、2023年、安藤百福賞受賞おめでとうございます。

(阿部副センター長) ありがとうございます。

(上坂委員長) それから、言及があったのですが、この原子力委員会の定例会議でも昨年4月16日、元農業生物資源研究所の中川仁さんにお越しいただいて育種のお話を頂いた。主に

はガンマフィールドでお仕事されていたので、ガンマ線とイオンビームとの比較もありました。今日13ページ辺りから20ページ辺りですね。非常に詳細にLETの効果、最適化、それからゲノムの分析、変異技術ですね。詳細に分析されております。

それで、外用放射線がん治療において、重粒子線炭素と、それから粒子線陽子線と、それからX線があります。がん殺傷能力に関しましては今日の資料の10ページ辺りにあるDNA損傷の様子のように詳細に説明されてますので、13ページですね。13ページに、これは重粒子線の場合ですけれども。DNAへ与える影響というのは大きい。そしてまた最適化で変異をコントロールしているということかと思えます。そういうふうに理解してよろしいのでしょうか。

(阿部副センター長) はい、そう考えております。LETがとても高い、重いアルゴンイオンの照射によって発生するDNA損傷は、クラスター損傷といって修復が難しいようです。なんとか修復できても、元通りとはならず、大欠失とか染色体再構成といった複雑な変異を伴います。それに対して、変異率が高いLET30の炭素イオン照射では、飛来するイオンの数がアルゴンイオンの60倍程度多いので、多数の小さな損傷が発生します。多くは正しく修復されているようですが、適度に発生するDNA修復ミスによって一遺伝子破壊に適した小さな変異が発生すると考えられます。

(上坂委員長) 分かりました。

それから、その中で今日阿部さんは色々な制約でいろいろな施設を活用されるということをおっしゃいました。例えば10ページでしょうかね、施設の数があるのですが。この表のこれらの施設で、今日イオンビームの方は詳細に分かりました。左の方は、ガンマフィールドはもうなくなっていますけれども、まだ10施設、ガンマ線の照射の場がある。これは大小様々のRIを使ったガンマ線照射場でこういう研究をされているということ。

(阿部副センター長) そうですね。依頼すれば当てることは可能な施設はあります。

(上坂委員長) そうですね。

あと、電子線ビームの施設も一部入れているという話も伺ったのですが。

(阿部副センター長) 高崎の量研機構の高崎研究所がガンマ線も当てれますし、電子線も当てられて、電子線はガンマ線と基本的に作用は同じなので、どちらでも当てれますよということです。

(上坂委員長) そうですね、分かりました。

それから、中川様から、放射線育種の日本での市場規模は約3,000億円というふうに

伺いました。今後の経済規模の発展ですね。先ほどから質問があったのですけれども、非常に期待したいところがございますが、いかがかと。

今後の技術応用が拡大していくのか、照射施設が増えるのかとか。それから電気代の問題があって、選択肢的に多くあった方がいいというようなお話もありました。非常に重要な技術なので、成長して行ってほしいなと思うのです。どうでしょう、市場規模は。

(阿部副センター長) 市場規模は、ごめんなさい、ちょっとよく分からないです。放射線育種場は農水省の所管でしたので、まず生産高というのを数字で示さないといけなかったんですけども、理研は幸い文科省なので、売上げ幾らって余り言われたいです。すみません、分かりません。

だけれども、照射施設は増えるといいなと思っております。世界的に言うと、先ほどの繰り返しになりますけれども、中国とそれから韓国にこれから大規模の加速器施設ができ、運転を今年、来年ぐらいに開始しまして、どちらも産業利用を考えております。どちらも知り合いがいるのですけれども、育種もやりたいと言っておりますので。

どちらにしても、今のところイオンビームの育種というのはアジアが中心になってますので、そういうところで共存共栄していければいいなと。

(上坂委員長) 分かりました。

2ページですけれども、主に育種の3種類ですね。交配育種と突然変異育種、これがイオンビームの関連ですが、もう一つは分子育種がある。ゲノム編集というのかなり使われていると思うのです。今後のゲノム編集との関係はいかがですか。相補的にやっていくのでしょうか。

(阿部副センター長) ゲノム編集は簡単にすぐできるように言いますが、まだまだ技術的に大変なところがあります。例えば、培養技術がなくちゃ駄目で、形質転換する技術もなくちゃ駄目で、あと、そのためにはターゲットとする遺伝子がないと駄目なわけですね。そうすると、ターゲットにできる遺伝子というのはまだ限られていますから、イオンビーム照射で農業上有益な変異体を得られて、その形質の原因となっている新しい遺伝子が分かるとその遺伝子は当然ゲノム編集の新しいターゲット遺伝子になりますので、共存共栄していけると、双方向的に技術を高めていけると考えております。

(上坂委員長) ありがとうございます。

以前に塩害に強いイネの育種の話も伺ったことがあるのです。福島沿岸とか能登の沿岸の辺りの水田ですね。塩害があるということは理解して、こういうところにこの塩害に強い

イネのみならず、作物の育種利用というのは期待したいところです。いかがでございましょう。

(阿部副センター長) 私たちはモデルとして「日本晴」というイネ品種で耐塩性のものを選んで、東日本大震災の後被災地で栽培を試みました。結構収量が減らなくていい成績だったんですが、今のブランド米と比べると「日本晴」はそんなに美味しくないんです。そこで、宮城県のおいしい品種「まなむすめ」に関して耐性のものを選抜しておりまして、それはすぐ利用するというのじゃなくて、交配親として系統保存しておりますので、御希望があればいつでも使えるんじゃないかと考えております。

(上坂委員長) 分かりました。

暑さに強い品種というのは、今温暖化ですので非常に重要かと思ひまして。思い出すに、1990年の大阪での花博のときにサフィニアという花が、イオン育種で、暑さに強かった。

(阿部副センター長) ペチュニアの「サフィニア」シリーズはサントリーフラワーズが開発したのですが、「サフィニア」の新色の幾つかはイオン育種で開発しています。「サフィニアローズ」は2004年浜名湖花博国際コンテストでシルバー賞を受賞いたしました。また先ほどご紹介したベーベナの「花手毬コーラルピンク」と「花手毬サクラ」も同様にシルバー賞を受賞いたしました。

(上坂委員長) 非常に暑さに強くて、花博なのに夏にサフィニアのみが咲いて、私も行ったのですけれども、とても暑い夏でしたね。それでイオン育種が注目を浴びて。それで発展したと、そのきっかけになったかなと思います。以前、私も学生への講義の中でもその話は使わせていただきました。

最近、去年の夏ですかね。コシヒカリより夏の暑さに強い米の品種が出ているというのを伺ったんですが、あれもイオンなのでしょうか。

(阿部副センター長) いえ、あれは選抜育種です。埼玉県「彩のきずな」は2007年の猛暑の中で選抜されました。

(上坂委員長) 選抜育種ですか、そうですか。でも、今後もそういう暑さに強い育種というのは色々出てきますよね、可能性は。

(阿部副センター長) はい。京都大学と福井県と共同研究で猛暑のマーカーになるイネの変異系統もイオン育種で育成しています。

(上坂委員長) 分かりました。

それから、イオンビームの施設の地図があったのですけれども、5ページです。先ほどの

経済規模のところにも関連するのですが、例えば重粒子でなければ、使う粒子との兼ね合いですけれども、それほど巨額な施設でもないように思いますのでね。例えばPET用の薬剤を製造する施設というのは日本に10台以上、10施設以上ありますからね。この技術はとても重要だと思います。耐環境あるいは食の問題とか、それから花の育種もあります。今後是非ここに少しずつでも発展させていただきたい。あと、時間の問題もありますね。少ない中央拠点のみならず、分散施設で照射してすぐに育種に持って行った方がいいということもありますからね。施設が増えていってほしいですね。

今、理研の中では施設を増やしていく議論はあるのですか。照射施設を増やそうという。(阿部副センター長) 物理学のために新しい加速器、今は捨ててるビームをリサイクルしてもっとビーム量をふやすようにするエコ加速器とか、RRCに変わる入射器とか、案はいろいろあるんですが。まずは核物理学の発展のために、それがいずれ生物学にも使えるようになるので、建設できるといいなと思っています。

(上坂委員長) なるほど。例えば医療用のRI製造ですと、中エネルギービーム陽子でいいですね。加速器への負荷が少ない。加速器だけではなくて、ターゲット、あと化あと化学的取扱技術は理研でも本当によい研究もされている。それが今後の分散的な照射拠点にも貢献するのではないかと考えておりますけどね。

やはりこの育種の場合はLETのコントロールがあるから、少し重い粒子を加速できた方がいいということですね。

(阿部副センター長) そうですね、炭素は必須です。

(上坂委員長) そうです、それぐらいですね。はい、分かりました。

それから、昨年12月18日ですけれども、FNCAというラムフォーラム・フォー・ニュークリア・コーポレーション・アジアという活動とシンポジウムが25周年を迎えました。原子力委員会が主催いたしました。アジアの加盟国の25年間の原子力エネルギーと放射線利用の研究開発と国際協力の報告がありました。その中で、多くの国がこの放射線育種の成果をととても多く強調されて説明されておりました。是非今後理研の阿部さんのグループでも国際会議で是非御出席いただいて、研究と実用化の成果を御紹介いただければと思いますが、いかがでございましょう。

(阿部副センター長) はい、御協力できることはしたいと思います。よろしく申し上げます。

(上坂委員長) よろしく申し上げます。

私からは以上でございませう。

追加の質問等ございますか。

ないようですので。

では、今日はどうも御説明ありがとうございました。

(阿部副センター長) ありがとうございました。

(上坂委員長) 議題1は以上でございます。

議題2について、事務局から説明をお願いいたします。

(山之内参事官) 次回の定例会議につきましては、令和7年1月21日14時から、場所としては、中央合同庁舎8号館6階623会議室となります。議題については現在調整中でありまして、原子力委員会ホームページなどで後ほどお知らせさせていただければと思います。

以上でございます。

(上坂委員長) ありがとうございます。

その他、委員から何か御発言ございますでしょうか。

御発言がないようですので、これで本日の委員会を終了いたします。お疲れさまでした。どうもありがとうございました。

—了—