

第12回原子力委員会定例会議議事録

1. 日 時 令和6年4月16日（火）14:00 ～ 15:25

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、岡田委員、畑澤参与

内閣府原子力政策担当室

徳増審議官、山田参事官、梅北参事官

元 農業生物資源研究所 放射線育種場

中川場長

4. 議 題

(1) 原子力白書に関するヒアリング「放射線育種場および放射線育種」（元農業生物資源研究所 放射線育種場長 中川 仁氏）

(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6年第12回原子力委員会定例会議を開催いたします。

本日、直井委員は日仏原子力委員会出席のため、フランスに出張しており欠席となります。また、本日は畑澤参与に御出席いただいております。よろしくお願いいたします。

昨日15日、月曜日から21日、日曜日まで科学技術週間となっております。「科学技術週間」は、科学技術について広く一般の方々に理解と関心を深めていただき、日本の科学技術の振興を図ることを目的として、昭和35年2月に制定されたものであり、毎年4月18日の「発明の日」を含む1週間を「科学技術週間」と定めております。

そこで、全国各地の科学館、博物館、大学、試験研究所などでは、この科学技術週間を利用して講演会、展覧会、映画会、座談会、施設公開など、様々な催しが行われております。例えば、日本原子力研究開発機構（JAEA）の各拠点、高エネルギー加速器研究機構（K

E K) などでも、この期間に様々なイベントが開催されますので、御関心のある方は足を運んでいただき、科学や原子力に対する理解を深める契機にさせていただければと思います。

それでは、本日の議題ですけれども、1つ目は、原子力白書に関するヒアリング「放射線育種場および放射線育種」、2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。

(山田参事官) 事務局でございます。

1つ目の議題は、原子力白書に関するヒアリング「放射線育種場および放射線育種」について、元農業生物資源研究所、放射線育種場長、中川仁様から御説明いただき、その後質疑を行う予定です。

本件は、「原子力利用に関する基本的考え方」の3. 7. 「放射線ラジオアイソトープの利用の展開」に主に関連したものでございます。

それでは、中川さん、よろしく申し上げます。

(中川元場長) よろしく申し上げます。

(上坂委員長) 先生、お座りになってください。

(中川元場長) 立った方がやりやすいので。

本日は、「放射線育種および放射線育種場」について、お話しいたします。

本日の話題としては、簡単な説明と放射線を用いた突然変異育種とは何かということ、それから、照射施設について、放射線育種の活動はどんなものであったかということと、世界で突然変異品種はどれぐらいあるか、日本でどれぐらいあるか、その経済効果はどうかとか、それとガンマ線とかイオンビームとか、その緩照射とか、その比較、手法の比較、そして海外の照射施設について説明いたします。

この頃結構放射線育種が話題になっています。その一つの理由は、最近イオンビーム照射で育成したカドミウム極低吸収品種の「コシヒカリ環1号」というのが育成された。これまでイオンビームというのは観賞用の花に対する品種改良が多かったので食用として始めてなんいたのですね。それから2番目としましては、これは多分このこととも関係するのかもしれませんが、2024年2月28日に、日本育種学会から「突然変異を利用した作物育種の安全性と重要性に関する声明」というのが出ました。これは私にとっては非常に突然で驚いたのですけれども、というのは我々は、ガンマ線で照射した突然変異品種は、もう既に世の中に出回ってしまっていて、安全性なんて、もうそれはパブリックアクセプタンスが得られているものだと思ったら、突然、育種学会で安全ですよという声明を出したのです。

ね。その理由は、多分、上のイオンビームが新たなものであるということと、最近、御存知かもしれませんが、ゲノム編集、そういうものが新たに加わったことによって、突然変異育種というのがかなり幅が広がったということがあるのかなと感じます。3番目としましては、残念ながら、2023年度で私たちがやってきた放射線育種場の照射業務が終了したということでもあります。

そもそも、放射線育種はというときに、FAO/IAEA、すなわちウィーンの国際原子力機関にある突然変異育種の大本山みたいなところで、そのリーダーだった、お亡くなりになったのですけれども、ピエール・ラゴダさんがニューヨークタイムズの記事に答えて、説明しているのですね。それは「放射線育種というのは、自然と同じことをしているんですよ。私は自然が行うこと以外の何もしていません。私は遺伝子素材そのもの以外は何も使っていません。」と話しています。これはある程度遺伝子組換え技術を意識しているのだと思うのですけれども、さらに「自然突然変異というのは進化の原動力である。」と話しています。これは、この瞬間でも、我々の体の中を放射線が通ってしまっていて、それによって生物すべてに突然変異が起こるわけですね。そういうふうなのをまねしているだけなのだ。だから、「人為突然変異というのは、普通では出現頻度の低い自然突然変異と同じ原理で放射線を用いて変異を起こさせて出現頻度を高め、育種家が育種に掛かる時間を短くし、作物の進化を手伝っている。」というふうな解釈ですね。

今言ったのは、パブリックアクセプタンスの問題というのがまたいろいろありまして、実は私は遺伝子組換えの特許を持っているのですけれども、残念ながら安全性は確認されても日本では遺伝子組換え作物の栽培は農家の畑では全く行っていませんよね。だから科学的な安全性の問題とパブリックアクセプタンスの問題は全然違うのだということをまず頭の中に入れてもらって、イオンビームはどうだとか、あるいはゲノム編集技術はどうだと、そういったことが、私はどれも安全だと思っているのですけれども、パブリックアクセプタンスが得られるかどうかというのは、これはまた別の問題であるというふうに考えています。

突然変異は今言ったように、今この瞬間にも我々の体の中、放射線が通ってしまっていて、自然突然変異が行っています。その率というのが10のマイナス9乗、1年間にゲノム中の塩基対について、10のマイナス9乗起こるということですね。ほとんどゼロに近いと思われるかもしれませんが、一方、人為突然変異というのは、放射線を使ったり、化学物質、それからトランスポゾンというようなものを使って、これを1,000倍ぐらい上

げる。すなわち10のマイナス6乗ぐらいまで上げる。自然と同じ原理を使って率を上げるというのが突然変異育種なのですね。

今言ったようにこの自然突然変異率の10のマイナス9乗は低いかという話ですけれども、人間の遺伝子の塩基対の数というのは10の9乗ぐらいあるのですね。ということは、1つの細胞で1年に1個ぐらいは突然変異が起こっているのですね。1年に一回ぐらいは。さらに、その変異がどこで起こるかによって、次世代に伝わるかどうかということがありますから、それは頻度は低いということになりますけれども。ですからそういった意味では変異は低いと言っても、1年に1個ぐらいは起こっているという計算ですね。

我々は突然変異育種をやるときに、各育種材料に対する適正照射線量を決めるわけです。というのは、非常に放射線に弱い作物もあれば、強い作物もある。ちょうど変異が効率的に得られる線量を探すのですね。この写真は、右端から0グレイから100、150、200グレイの放射線を種子に照射して、そしてその発芽試験をする。そうすると線量上がるにつれてだんだん草丈が下がっていくようになっていきますね。我々はこういうふうなことをしたときに、ちょうど下がり出す肩のところ、ここでいうと200グレイとか250グレイですずっと横ばいに来たのが下がり出していますよね。このあたりを我々は経験的に突然変異育種に使う適正照射線量だということを決定して、今度は大量の種子に対してその線量を当てて変異を誘発して育種をしていくということです。

もう少し分かりやすく説明すると、例えば一番左のやつ、横軸はずっと右に行くほど線量が上がっていているのですね。縦軸は、1というのは例えば発芽率でいうなら100%、それが線量が上げていくにしたがって下がっていくわけですけれども、0.5というのは発芽率が50%になったとき、これはD₅₀とかよく言いますが、これが、この作物の場合では50グレイのところでは0.5、すなわち50%になっている。一方、強い方ですね、こいつなんかは400グレイまで行ったときに50%になる。こういうふうなことを先ほどやった試験で調べて、我々が使うのは先ほど言ったように、ちょうどこの肩みたいなところですね。下がり出すところが突然変異育種に非常に有利です。というのは線量を上げて端の方まで行ったら、変異そのものは増えるかもしれないけれども、今度は生きていくものの数が下がってしまうから、得られる全変異個体数で考えると、やっぱりあの辺を選ぶのが一番いいというのが経験的に分かっています。

これは、後で説明するガンマーフィールドの仕組みです。ガンマーフィールドというのは、中心に線源がありまして、一番端のところは土手があって、ここは線源から100メートル

ルなのです。御存じのように放射線が近いほど線量が高くて、距離の二乗に反比例して線量は下がってきますよね。そうすると今言ったように放射線に強い作物は手前に置いて、弱いものは後ろの方に置いていって長い時間かけて突然変異を出していくという技術です。

これは常陸大宮市にあるのですけれども、ここでは大体研究棟はこっち側にありまして、そこから道を挟んでいくと、ここに管理区域という黄色い線を引いてありますが、ここにはフェンスがしてあって、誰も入れないようになっています。入る場所はこの門のところのこの1か所だけになっています。この施設で照射するときはどうするかというと、当時7名いましたが、第1種放射線取扱主任者の資格を持つ研究員が交代制でまず朝一番にすることは、9時前に来て、このガンマフィールド中をずっと回って安全性を確認する。そして門を開けると、9時頃に他の研究員が入って、圃場作業員も入ってここで作業をする。私がいるときは、照射時間は8時間で、昼の12時前になったら、今度はまた同じ研究員が行って、誰も中に残っていないことを確認して、ここでボタンを押す。そうするとその5分後にコバルト線源が出てきて照射が始まるわけですが、5分以内に外へ出て、この鍵を閉めると、もう誰も入れないというふうなところです。ガンマルームは管理区域内のここにあります。後で言います。照射にはタイマーが設置されていて、8時間後、すなわち午後8時に線源は元の位置に格納されて照射が自動的に終わります。

これはガンマフィールドを上から見た図ですけれども、半径100メートルの円状でして、ここに土手があって、ここに照射塔がある。これは世界でも最大規模の野外照射施設ということで、原子力の平和利用のシンボルというふうになってきたと私は理解しているのですけれども、中心から、先ほど言ったように円形状に異なる距離のところではいろいろなものを植えて、変異を出している。

これは中心にある照射塔で、ここが鉛の箱で、この中に88.8テラベクトルのコバルト60の線源が入っています。制御室からボタンを押すと、この場所ですね、半球状になっている、そこにコバルト60が出てきて、照射が始まります。ここには上部の遮蔽板と下部の遮蔽板があります。その隙間をガンマ線が通って照射される。この下の装置は何をしているかということ、もしもこの線源が戻らなかったときには、これを下から上げてふたをしてしまうというふうな仕組みの安全装置です。これまで使ったことはないですが、そういう安全装置も付けてあります。

これは照射塔を横から見たところですが、今説明したところはこの場所ですね。この線源から一番近い場所というのは、線源から10メートルの畑のこの場所なんです。この10

メートルの地点の線量はというと、1日2グレイほどになり、自然界で我々が受けている放射線の30万倍です。ということは1日に自然界の1,000年分照射することができるのですね。ですから先ほどラゴータさんが言ったように、我々は進化を加速しているのだ。だから地球上で1,000年間に起こる変異をここで1日で起こすことができる線量になっているのですね。ですから、やっていることは自然と一緒にしようというのは、これはガンマフィールドという場所では非常に説明しやすいですね。一番遠いところは、100メートルの地点が自然界の2,000倍。そういうふうなところで適当な照射線量の場所を探して、いろんな作物に変異を出していく。

ガンマフィールドと同じようによく使われたのが、このガンマルームでして、これは遮蔽した建物の中にある照射装置の入った部屋で、これは44.4テラベクトルのコバルト60が入っていますけれども、これは遮蔽してありますから、照射している最中でもガンマルームの外側を歩くことができます。また、ガンマグリーンハウスという、セシウム137を線源にして温室内で熱帯作物を照射する施設もありましたが、これは私が場長をしているときに廃止しました。

ここからは、世界でどれぐらい突然変異品種があるのかという話ですけれども、実際の数字というのは、多分、分からないのですけれども、FAO/IAEAのところに、今でもこれにアクセスしてもらくと、突然変異品種のデータベースがあります。これを見ると、この2023年3月の時点、短期間にそんな大して数は増えていないのですけれども、3,402品種が登録されています。その登録している品種の内訳をできるの、国別で見ると、1番が中国で、このときは817品種、2位が日本で500品種、3位がインドで345品種、下の方を見ても8位にバングラデシュがあつて、10位パキスタン、11位ベトナム、12位インドネシア、韓国というふうに、上位15ヶ国並べたときに半分ぐらいがアジアの国々なのですね。ですから、突然変異育種というのはアジアの国々で非常によく利用されているということが分かると思います。

これは、我が国の2023年ですか、ちょっとスペルミスですけれども、突然変異直接利用品種332品種、入ってまして、この直接利用品種というのは、突然変異を出して、それをそのまま品種にしたもので、後で言うようにそれを何か他の品種と交配して作ったものは間接利用品種と言うのですけれども、これを見ると、まずガンマ線が56%。ですから我が国の突然変異直接利用品種のうちの56%はガンマ線。8.2%がエックス線。13.3%がイオンビーム。これ全部合わせると80%なのですね。ですから日本の突然

変異の直接利用品種の8割ぐらいは放射線照射でできているものである。それ以外のものは、化学変異原を使ったものが6%、ソマクローナル変異というのは培養して、培養すると変異が出ますので、それが13%という内訳です。ですから突然変異品種と作る際には放射線が非常に有効だということが分かると思います。

この内訳ですけれども、さっきの23年のは335品種になっていますから、このときに79作物について335品種の直接利用品種があります。この内訳を見ると、イネが49だとか、ダイズが19とか、多いのはキクの品種ですね、これは67品種。これを横に見ていくと、突然変異品種335のうちの、先ほど言ったように8割方が放射線で250、そのうちの全体でいうと40何%がガンマ線、ガンマ線利用のうちの七、八割は放射線育種で照射したものです。ですから放射線育種場がかなり突然変異育種に貢献してきたということが、これで分かっていただけだと思います。

先ほど言った突然変異間接利用品種です。これは良い品種が出ると、必ず育種家はそれを他の品種と交配して子供の品種を作ります。その子供とか、その孫とか、そういうのを間接利用品種と言います。その内訳を見るとほとんどイネでして、全部で488の品種のうちの438品種はイネで、そのほかコムギ、オオムギ、ダイズというようなものがある。

イネの突然変異直接利用品種の中で一番有名なのは「レイメイ」でして、「レイメイ」というのは、「フジミドリ」という、非常にいい品種があったのですけれども、背が高いために肥料をたくさんやると倒れてしまう。だから背を低くしよう。それでガンマ線を照射してできたのがこの「レイメイ」です。15センチぐらい背が低くなって、収量の面でも「レイメイ」の収量というのは記録を出すぐらいたくさん取れたのです。後にこの「レイメイ」の持っていた突然変異、劣性の*sd*遺伝子というのはアジアの「緑の革命」で、フィリピンのイネ研究所で作られた「IR8」が貢献したのですけれども、その品種の持っていた遺伝子と全く同じだということが後で分かったということですね。同じ遺伝子を使って、こういう品種ができた。

これは我が国でどれぐらい突然変異品種が普及したかということで、2007年のとき、内閣府の委託事業で、「平成19年度放射線の経済規模に関する調査報告書」というのがありまして、私も農業利用のところで調査や議論に参加して、そのときの突然変異品種のイネがどれぐらい畑に植わっているかを示したものです。1ヘクタール以上植わっている品種を全部足していくと、今言ったように「レイメイ」が大体このころ普及していますが、「レイメイ」ができてからずっと上がって、その後いろいろでこぼこしていますが、20

05年ぐらい、これは1960年から2004年までですけれども、この頃になると20万ヘクタール、毎年20万ヘクタールぐらいは突然変異品種が栽培されている。この20万ヘクタールというのは全水田面積の12%。ですから農家の畑の12%が突然変異品種であったということが言えるわけです。

これを単に掛け算して、経済効果というのをを出してみると、大体年間2,500億円ぐらいになります。このときにいろんな他の平和利用技術とありますけれども、それと違って点というのは、例えばさっきお見せした経済的貢献でみると、滅菌処理やラジアルタイヤも放射線照射をやっていますが、照射したら終わってしまいますよね。ところがこの放射線で作った突然変異品種の遺伝子というのはどんどん増殖していく。今言ったように交配して次の世代に行ったり、ですから一遍作ったものがどんどん増えていくという、非常に面白いところがある。この「レイメイ」の面白さというのは、「レイメイ」がいいから、みんなこれを片親に使ったりして品種ができたのですけれども、その間接利用品種、この438あるうちの半分ぐらいは「レイメイ」の子孫なのですね。あと皆さんが食べられたことがあると思いますが、「キヌヒカリ」とか「ミネアサヒ」、これはみんな「コシヒカリ」にガンマ線を当てて背を低くした品種なのです。これらの子供の品種なんかは20%ぐらい。ですから、この3品種合計で、大体、全突然変異間接利用品種の8割以上が、今現在のイネの間接利用品種になっています。

先ほどの図は2005年まででしたけれども、最近はどうなのだというデータは、ここにあるような米穀安定供給確保支援機構というのが、イネの品種の毎年トップ20の栽培面積比率のパーセントを出しているのです。栽培面積の実数を出しているわけじゃないのです。それを私が全栽培面積から換算した数値も示してしまっていて、それをずっと見ていくと、突然変異品種の中で「はえぬき」が1位で、水稻品種全体で6位ということです。1位はもちろん御存知のように「コシヒカリ」ですけれども、6位に入っているのが「はえぬき」で、これは栽培面積割合が2.8%、「まっしぐら」「キヌヒカリ」「あさひの夢」、皆さん御存じだろうと思っていますが、6位から20位ぐらいまではみんな突然変異品種なのですね。片親に「レイメイ」であるとか、「ミネアサヒ」とか「キヌヒカリ」を使っています。これ全面積割合、パーセントを足すと大体17.8%なのです。これはトップ20ですから、これ以外にも「ミルキークイーン」とかありますよね。ああいうのも入ってくると、多分20%ぐらいは日本の農家の田んぼでイネの突然変異品種が植わっているということが言えると思います。

ダイズも同じでして、ダイズはこの赤字の品種が直接利用品種、この青い方はそれを交配して作った間接利用品種ですけれども、これを見ると合計が大体10%ぐらいですね、農家の畑のダイズの10%は突然変異品種であるということです。

今度は特性の方にいきますけれども、日本のイネの品種というのはそんなに種子が穂からぼろぼろ落ちるということはないのですけれども、インディカというインドのお米というのは収穫するときに脱穀しやすいように、穂がちょっともろい、脱粒しやすいのですね。最近、我が国では餌米ですね、牛の餌にトウモロコシなどのかわりにイネを使おうという動きがありますけれども、そのときにインディカイネの特性を利用すると収量が上がるのですね。ですから、それを使った品種が脱粒する餌作りでも困るものですから、それにガンマ線を当てると、すなわちある遺伝子をノックアウトすると脱粒しなくなるのです。それでできたのが「ミナミュタカ」とか「ルリアオバ」、こういう、イネ以外でも難脱粒性は結構放射線を使って出しやすい特性ですね。

次はたんぱく質の話ですけれども、白米の中には結構たんぱく質が入っていて、日本人は15%を米からたんぱく質を摂取しています。最近、日本では腎臓病患者がずっと増えてきている。腎臓病患者の中でたんぱく質の摂取制限を受けている人というのは、白米の中に7%ぐらいたんぱくが入っているので、毎食食べることができない。これを半分以下にしたら、毎日食べられるということで、たんぱく質の少ないイネを作ろうということで品種育成が行われました。

できたのがこの「LGC1」という品種です。お米のたんぱく質には消化しやすいたんぱく質と、人間が消化できないようなたんぱく質があるのです。このLGC1という品種は、人間が消化しやすいグルテリンというのが、ここのところとここのバンドにありますけれども、親の「ニホンマサリ」よりも量が減っていますよね。ですから、消化しやすいのが半分ぐらいになっている。ですから、実際にこの品種は病院で腎臓病患者向けの病院食として使って成功しているのです。ただ、患者さんにしたら、「ニホンマサリ」というのは天皇陛下がお手植えするお米ですけれども、余りおいしくないと言ったらあれですけれども、「コシヒカリ」ほどおいしくないのが問題でした。そこで、次は「コシヒカリ」にガンマ線を当てて、今度はもう一つの消化しやすいたんぱく質のグロブリン遺伝子をノックアウトして、これを全く作っていない系統を育成したんです。こいつと先ほどのLGC1を交配してできたのが、この「LGC-潤」と「活」という品種で、消化しやすいたんぱく質はこんな減ってしまって、人間の消化できないのはこういう風にかなり増

えています。ですから「低蛋白質米」というのですけれども、実際はたんぱく質の全量は減ってないのですね。人間の消化しやすいのが減って、消化できないのが増えたから、結果的に「低蛋白質米」になっているというので、これはおいしくなって、なおかつ、たんぱく質の含量がさらに減ったということで非常に期待されているのです。

ガンマーフィールドという、やはり代名詞は「ゴールド二十世紀」ナシです。これは「二十世紀」という梨で、非常に黒斑病に弱くて、病気にかかるとこういうふうに、実も真っ黒になってしまうのですね。これの抵抗性の突然変異を出そうということで、ガンマーフィールドの40メートルぐらいから、60メートルのところまで苗を植えていった。その後ずっと突然変異が出るのを待っていたわけですね。そうしたら、ある年、ナシの全てに黒斑病が発生して、全ての枝が病気にかかってしまった。そしたらこの一枝だけ、緑のまま全然病気にかかっていなかった。この1枝をもとにしてできたのが「ゴールド二十世紀」、これが黒斑病に抵抗性になったのですね。

口の悪い人は、突然変異品種なんて、放射線を当ててじっとおまえらは待っているだけだろうという話があるのですけれども、実際はこのときに面白い技術ができたのですね。これは、ナシの黒斑病というのは、こういうふうな構造の毒素、トキシシンを出して、このAKトキシシンというのが植物を真っ黒にするのですね。ですからこのトキシシンは京都大学で構造を明らかにしたのですが、これは人工合成もできて、このシャーレの中に濾紙を敷きまして、この濾紙に毒素を浸ませます。そして、採ってきた枝の上から、すなわち若い方から1葉、2葉、3葉、4葉、5葉と葉っぱをパンチカードで切り抜いて、直径1センチぐらいを切り抜いて並べます。そして、シャーレのふたして、これで二日ほど待つと、抵抗性の葉はいつまでたっても緑なのです。「二十世紀」は毒素に弱いですから真っ黒になってしまうのです。「ゴールド二十世紀」はこう見ると、ちょっと黒いところはありますけれども、ほとんど抵抗性になっている。この技術を使えば、さあ、今から抵抗性の枝を探そうというときに、枝という枝を全部持ってきて、これと同じことをやればすぐ見つかるわけですね。「ゴールド二十世紀」を作るのに、苗木を植えてから品種になるまで実は20年間掛かったのです。それがこのスクリーニングの方法ができてから、「おきゴールド」という抵抗性品種は3年でできましたし、「寿新水」は4年でできましたし、インドリンゴの「放育印度（ほういくいんど）」というのがあるのですけれども、それも同じような技術でリンゴ斑点落葉病に弱い「インドリンゴ」から育成した抵抗性品種が3年ぐらいでできたのです。ですから突然変異育種というのはみんな変異をいっぱい出せばい

いわという人がいるかもしれないけれども、大事なのはスクリーニングです。優れた誘発技術が優れたスクリーニング技術と合わさると非常に有効な技術になるという例です。

花で突然変異品種が多いのはなぜかという、変異が目で見えてすぐ分かるからですね。花の色が変わったり、形が変わる。ですから花の品種は多いです。こういったものはいい変異誘発技術とスクリーニング技術が出てくるといい品種が出る。これはキクの突然変異ですけれども、ガンマーフィールドにキクを植えておくと、こんなのが出てくるのです。これはキメラになっている。これなんか品種にならないのですよね。こいつの花びらを組織培養して、ここからもう一回植物を作り出すと、これがもとの「太平」という品種ですけれども、これだけ色の変異が出てくるのです。これはもとの「太平」ですけれども、ここからこんないろんな形のもが出てくる。ですから、キクの品種でこういうふうな変異が出ていますが、みんなもとは同じ、この「太平」という品種なのです。ここからこれだけいろいろな色をしたのが出てくる。

次に、これまで分かっていなかったのは、一体DNAでどんな変異が起きているのだということですね。これは現在、理研にいる森田竜平君が放射線育種場で調べたのですけれども、いろいろな20ほどのイネの突然変異が系統でずっと維持されているのです。ですから次世代に伝わるような安定した突然変異のゲノムを調べてみた。そうしたら、大きく分けて小さな欠失が多いのですけれども、1塩基がなくなっているもの、3塩基がなくなっているものという小さな変異、これが6割ぐらいありますかね。一方、巨大欠失、これなんかは4万塩基がポーンと抜けてなくなっているんですね。これなんか10万塩基とか抜けている。そういうのが17%ぐらいある。

次に、塩基置換というのが、これは化学物質を使うときにAがTに替わるとか、CがDに替わるとか、塩基が入れ替わってしまうだけで欠失は起きていない。そういったものが少しある。逆位というやつは、大きなものが上下逆さまになっているのです。そういうのが2つぐらいですけれども出ている。面白いことに、なぜかその真ん中の大きさがありません。小さいのがあって、巨大はあるけれども、真ん中の1万塩基ぐらいの欠失が出てこない。これ、どうしてだろうねというのがいろいろ議論があるところですが、大体こんな変異が出るよということが分かってきたわけです。

また、面白いのは、多分ここで突然変異育種をよくご存じの方がいたら、突然変異育種では劣性の変異ばかりで優性の変異が出ないと言う人がいると思うのです。やっぱり欠失するのだから、みんな劣性になると言うのですけれども、実は先ほどの消化しやすいたんば

く質を作れなくして使う *LGC1* というのは優性の変異なのです。これは細かな説明をすると長くなりますけれども、RNAi といって、ここにストップのコドンがあって、それがなくなってしまうから両遺伝子のRNAがつながった長いRNAが作られて、この部分とこの部分とが相同だから二重らせんになって、RNA干渉 (RNAi) という現象が起きて優性になる。一方、大きな欠失でこの並んだ遺伝子を2つともなくしてしまうと劣性の変異になる。ですから、位置と場所によっても優性か劣性かの形質が変わってくるというようなことがあります。

昔からよく、ガンマ線とイオンビームは比較されることがあって、簡単に言うとガンマ線というのは散弾銃みたいなもので、この1つの細胞に2,000個ぐらいバーンと当たるわけですね。一方、イオンビームというのは強くて、1つの細胞に3発か4発当たっただけでも上のガンマ線以上の効果を出すのです。ですからこういうふうな違いがあるということは昔から言われていて、多分イオンビームはガンマ線とは変わった変異も出さるだろうという、そういう期待があってやったのですけれども、最近の例で、2019年に2つ論文が出まして、ただし試験した個体数は少ないのですよね。

一つ目はジャポニカのイネで、7固体だけなのだけれども、一方にガンマ線を当てて、もう一つはイオンビームを当てて、そのゲノムの変異、すなわち全部の遺伝子を、端から端まで読んでいくのです。全部読んでしまったあとで元の品種とどこが変わったかって調べてみると、ここにあるように塩基置換、すなわち先ほど言ったAがTに替わるとか、欠失が起きる、あるいは挿入される、構造が逆になるとか。そのパターンを見ると、上がガンマ線で下がイオンビームですけれども、余り大きな差がないのです。誤差の範囲でほとんど有意差がない。ここだけちょっと有意差が出ていますけれども、大した大きな差ではない。

二つ目のこちらはやはりインディカのイネで、これも各々4系統と6系統ですから多くないのですが、実際には1個体の全てのDNAを読むから、そんなたくさんはできないわけですね。ただし、ガンマ線あるいはイオンビームを照射した後代のこの各々4個体、6個体で比較しても同じように、イオンビームもガンマ線も同じような変異を出しているというようなことが最近分かってきました。もちろんこれは10個体ぐらいでやっているわけですから、これを100個体やったらどうなるかとか、また新しいことが出る可能性は十分あるのですけれども、現在、私自身はガンマ線が出す突然変異も、イオンビームが出す突然変異もいわゆる基本的には変わっていないというふうに考えています。

あとは先ほど言うように、放射線以外には化学物質。化学変異原というのは大体発がん性物質みたいなものですが、そういったものと、培養変異と、それからトランスポゾンとって、飛ぶ遺伝子があって、そういうのを使って突然変異を出す技術があります。その利点と欠点を示したのがこの表です。これは変異を作出できるかどうか。多分、二重丸でどれもできます。ちょっとゲノム編集だけはちょっと技術が違うので離してあります。育種の利用の面ではというと、先ほど見たように放射線で作ったものが一番品種が多かったですよね。その次に化学変異とか、培養変異がある。

それではゲノムを研究したい。何か遺伝子を探したいというときにどれが良いかという話になると、やっぱり変異率の高い化学変異が割といいです。トランスポゾンなんかはかなりおもしろくて、突然変異した場所が解析すると簡単に分かってその変異形質も分かるものですから、よく利用されています。一方、放射線では、変異の率が低いものですから、大量のもののスクリーニングをやるときには向いていないですね。結論としては、品種を出すときには放射線、何か遺伝子を作りたいときには化学変異。では、なぜ変異率の高い化学変異原で品種できにくいかというと、化学変異を使うと1か所だけに変異のある変異体だけではなく、5か所も6か所も変異が入ってしまうのです。そうするとこれ品種を使おうと思うと、欲しいものは背の低い遺伝子だけなのに、何らかの花粉ができないだとかの劣悪形質や、目的以外の変異も全部入ってきたら、次に、育種作業ができないです。それを品種にするために、目的の遺伝子だけを持つものにするのにさらに時間がかかってしまう。そういった問題があるのと思っています。変異原は、単に突然変異率が高ければ良いということにはなりません。適正線量を照射した放射線照射の変異率が作物育種には適切なのだろうというのが、育種家としての結論です。

栄養繁殖性の作物については、どれも使うことができます。ただし、目的の遺伝子を探すというときには、キメラが出たりして、純系にするための困難があります。

次にゲノム編集の話ですが、これまで突然変異育種というのは、いろいろなものを作り出して、そこからスクリーニングで探すというのが基本的な技術ですが、ゲノム編集というのは遺伝子は分かっているから、目指した突然変異だけを精密に作ることができます。それがゲノム編集の一番の利点ですね。効率よく作ることができる。ただし、ここにあるようにゲノムが分かっていると使えないですね。全ゲノム配列が明らかなイネ、ダイズなんかはできますけれども、トウモロコシもできますかね。例えばキクはといたら、キクの遺伝子が分かっていたら、この技術は使えませんよね。そういった欠点はあります。

あとは施設の問題です。放射線にペケしてあるのは、例えば放射線育種を維持するというのは相当経費と労力がかかりますよね。コバルト60の線源を交換するのに経費も掛ければ、放射線育種場では数名が当番制になっていましたが、ガンマフィールドやガンマルームの管理を第1種放射線取扱主任の資格を持つ研究者が毎日行って、いろいろ作業をするわけですから、そういったのを全部備えるのは非常にコストもかかるしスタッフもいる。これが一つの欠点なのですけれども、ただしこれが一つどこかにできてしまえば、突然変異育種をするために照射を依頼する研究者は、放射線育種場の場合は、基本的に1回照射するのは1万円だったと記憶しているのですけれども、それを処理してもらった種子をもらってくると、それ以降は何も余分なお金要らないですね。自分のところの畑でそれを植えていったら、腕力で品種を作ることができる。だから研究費そのものの投入は少なく済むのだけれども、誰かが、照射してあげなければいけない。例えばイオンビームにしたって原研であるとか、理研にしたって、突然変異を出してあげないといけないのですが、施設の維持には放射線育種場以上にお金も掛ければ、それから労力もかかる。ただし、もらった方はそれを使うだけでいいからお金はかかりません。例えばゲノム編集や遺伝子組換えを自分でやろうと思ったら、変異作り出して畑で植える前に、遺伝子操作するキットや装置や実験室が全部要りますよね。それを研究室ごとに持っていないといけない。それが無いのが、一つの放射線育種の利点と言えます。

先ほどアジアの国々でなぜ多いかというのは、割と研究室が貧しいと言うと語弊がありますがすけれども、余り研究費が出せないようなところが多くて、アジアの研究者なんかは圃場や労力が豊富で、目的とする品種の種子に放射線照射してもらえれば、腕力で品種育成をやるよというふうなところが多いので、突然変異品種がアジアに多いのかなという感じもします。

それから、難易度についてはあれですけれども、どんな作物でも使えるかという話になると、多分、それが可能なのは放射線と化学変異原ぐらいですね。例えば何か種名も知らないけれども、こんなのがありますと、見たこともないような植物を持ってきて、中川さん、これに変異出してくださいと頼まれたら、さあ、出してみましようと言って、たぶん変異を出しますよね。放射線育種はゲノムや遺伝子とかメカニズムが全く分からなくてもいろいろなのが出てくるわけです。ところがゲノム編集の場合は、ゲノムが分からなかったらできませんし、トランスポゾンにしても培養変異にしても、試験管内で培養できないような植物はいっぱいありますから、そういった意味では育種には、こういった放射線と化学

変異がやりやすいだろうと思います。

ここからは、アジアの方で。先ほど私が言ったガンマフィールドというのは、緩照射施設といいます。緩照射というのは緩い照射と書きますが、基本的に種子ではなく、生育中の生体照射で、これは弱いガンマ線、強いのは1日2グレイですから、低いというか、高いというか別ですけれども、我々で言うと割と低い放射線を長い時間、場合によってはナシの「ゴールド二十世紀」の場合は19年かけたわけですから、そういうのをかけるのを緩照射といいます。これは韓国の井邑（チョンウプ）というところに、原子力研究所の施設がありまして、これがガンマファイトロン、これは遮蔽した部屋ですから、照射している最中にこの辺をうろうろしてもできるのですね。その中には温度と光をコントロールした部屋が作ってありまして、この中で植物を育てながら生育中の植物に長期間照射することができる施設です。

もう一つの大規模な緩照射施設というと、これはクアラルンプールの郊外に、マレーシアの原子力庁にガンマグリーンハウスというのがあります。これは半径が30メートルです。ですから、ガンマフィールドの3分の1ぐらいの半径のものがここにあって、この写真は私が、ちょうどこれが出来上がったときに行って、私も講師を務めてみんなで放射線育種のトレーニングをやったのですけれども、これが照射線源のあるところで、ここからガンマ線が照射されるような施設です。この線源はセシウム137です。これも、グリーンハウスですから、ビニールハウスみたいになっていまして、その中でパイナップルであるとか、熱帯の作物、バナナみたいなものの突然変異出したりすることを行っています。

放射線育種をやってきたこれまでの国際協力的なものがありますが、その一つには文科省のアジア原子力協力フォーラム、FNCAというのがあります。この中で放射線育種プロジェクトというのがあります。私もプロジェクトリーダーを6年務めたのですけれども、これは中国の杭州で会議を行ったときの写真です。これは原子力委員をされた町末男さんが一緒に来られて、これをやった。この会議はアジアの参加国の持ち回りで、その国に行っては指導したり、共同研究を組み立てたりして、これもアジア原子力協力フォーラム（FNCA）のホームページ（<https://www.fnca.mext.go.jp/mb/introduction.html>）へ入っていただくと、かなりいろいろなことをやっていたということが分かってもらえると思います。

国際協力では、これは私が受け入れた、研修生たちです。結構放射線育種場で研修を受けた方が多いのですよ。これらの写真は、私が6年間、場長をしたときに受け入れた長期の

研究者で、バングラデシュから来た人、インドネシア、マレーシア、それから雪を初めて見て喜んでいてるところですけれども、それからタイの方、この研修生もマレーシア、そういった人を受け入れてかなりトレーニングをしました。短期の人の数はもっと多いです。1日ぐらいで訪問する海外や国内の訪問者は数え切れないぐらい多いです。一方、私自身もIAEAのエキスパートとして、いろいろな国々に行ってトレーニングしたり、レクチャーしたりやってきました。

著書としては、私自身が誇れるのは、この「Plant Mutation Breeding and Biotechnology」でして、これはIAEAから出た本なのですが、私もエディターを務めて、3人でこの本を作ったのですが、670ページぐらいある大きな本で、教科書としては世界でも1番になろうというぐらいで、これはフリーアクセスなのです。ですから、誰でもここにアクセスすると、無料で670何ページの本を読めるのですが、結構アクセス件数が多いものです。ユニークな点は、私がエディターしたから、結構日本人の研究者のレポートがたくさん載っているのです。普通、海外の本を読むと余り日本人が書いていないのですが、この本は結構日本人も貢献している。「MANUAL of Mutation Breeding」も、私もちょっと参加したことがあります。一番最近では、私はインドのこの元Bahbah Atomic Research Centreにいた人に頼まれて書いた、第12章の日本の野津全変異育種の歴史を私が担当したのですが、日本がそういった意味でも突然変異育種でも、アジアの中で非常にパイオニア的な研究をしてきたということになります。

まとめになりますが、読み上げると、1960年に開設した放射線育種場をですね、ガンマ線照射は残念ながら2023年で終わりましたということですね。放射線育種場のリーダー的立場としては先ほど申しましたように、アジアでリーダー的立場に立って、世界の突然変異育種に及ぼした貢献は非常に大きかったと思っています。ガンマ線は育種やゲノム研究に有効で、我が国でガンマ線照射して、育成した品種数は186あって、そのうちの136は放射線育種でできているもの。4番目として、原子力の平和利用としての突然変異育種は、先ほど言ったように増殖していく。面白い遺伝子を作ると、それは農家の畑でどんどん広がっていくという経済効果を持つ。ちょっとほかのと変わっています。先ほど言ったようにガンマ線とイオンビームというのはよく比較されて、どっちがいい悪いと言いますが、ゲノムで見た感じでは、今までのところでは数は少ないけれども、余り差はなさそうだというふうな結論です。

6番目として、アジアの国々では、現在もガンマ線を利用する突然変異育種が活発に行われておりまして、IAEAが進めるアジアの活動の中心は中国と日本がずっとやってきたのですけれども、そういう研究がなくなると特に緩照射技術はほかの国々に、マレーシアであるとか、韓国とかにシフトする可能性がありますねというのが結論です。

以上で、私の報告を終わります。

(上坂委員長) どうも、放射線育種の長年の実績、現状、それから世界の情勢をととても詳しく、例を挙げて御説明いただきましてありがとうございます。我々の生活に大きく貢献してくださっているのだなということが、本当によく分かりました。

それでは、委員会の方から質問をさせていただきます。

それでは、岡田委員、お願いします。

(岡田委員) 中川様、どうもありがとうございます。

私の方から質問をさせていただきたいと思います。私、このガンマフィールドの見学にも行ったことがあって、それがなくなったのはちょっと寂しいなというのが感想ですね。

そのことで、先ほどの6番ですけれども、これからどんどん日本からアジアに移っていく、アジアの方の活動が中心になるだろうとおっしゃっていましたが、日本での農業分野での研究者や技術者というのは、この放射線育種というのに余り関心がないのか、研究者がいけないのか、それとも違うものが原因で移っていったのかということをお聞きしたいと思っているのですが。

(中川元場長) 確かに照射業務をやっていて、依頼件数を見ていくと下降傾向にありました。

というのは、私もそういう育種をやったりしたのですけれども、一回照射してもらって、その材料を使って5年ぐらいその材料を用いて育種をやるわけですよ。そうすると明るくなる年にまた照射してもらおうかというとなんなことなく、次の一段落したときにまた新たなのを始めるということですから、そんな毎年毎年、依頼照射をどんどんやっていくというにはならないのですよね。ですから、全体的に、このような突然変異育種をする研究者の人数自体が多くない、あるいは減っているのかもしれないのですね。

基本的には突然変異で面白いのが出たら交配して作っていく。それと同じことは遺伝資源を使ってやることができますよね。遺伝資源でないものを突然変異で出そうというのが多いので、そういった意味で、それともう一つは突然変異育種のしんどいところというのは、例えばガンマ線を照射した種子はありますけれども、照射してもらった種子を栽培してももすぐには変異が出ないのですね。これを畑に植えて、袋掛けして、その次の世代

でメンデルの法則の3対1の中の、四分の一の劣性ホモのものが変異として出てくるわけです。いわゆる照射したM1種子の次世代のM2世代への増殖のところをやれる人がだんだん減ってきているというのがありますね。畑がたくさん要りますし、若い人で畑の業務が余り得意じゃない人も最近多いですから、イネやトマトだったらゲノムとか何かについて詳しい研究者だったら、ゲノム編集を使えば、遺伝子が分かっていたらすぐに狭い畑でもできるわけですよ。そういうのにも移っているということはあると思いますね。

(岡田委員) ありがとうございます。

次に、9ページですけれども、ガンマーフィールドの線源があって、ずっと次の手前に永年生木、生木っていうのですか、これ。

(中川元場長) どれですか。

(岡田委員) 一番右側です。これ、永年、ずっとそこに植えて育種をしているということなのですか。これちょっと分からなかったので説明していただきたい。

(中川元場長) そうなのです。ガンマーフィールドの面白いところは、弱い放射線をいつまでも変異が出るまで置いておけるわけです。ですから、長いのは例えばお茶なんかですね。お茶の突然変異なんかをやっている研究者がおりまして、それはお茶を植えっ放しですよ。もう10年でも20年でも置いておいて、そこからちょっと取ってきては、例えばカテキンやカフェインが増えている、減っているとか、そういう研究をしている。一枝でも出てきたら、それを今度は挿し木や接ぎ木などで増やせばいい。その枝変わりを見つけた時期に。大体、木は弱いのですよ。ですから木は大体遠くの方に、イネが一番強くて、一番手前でもちょっと出ないぐらい強いのです。ですから、作物によってその置く位置というのが全部違ってきます。基本的にはイネなんかはそんなに長く置くわけじゃないですけれども、大体その、いわゆる放射線感受性の強弱に応じた適正な場所を探すということです。

(岡田委員) ありがとうございます。

お話を聞いていて、育種というのは普通は長い間、何代も何代も掛けて農業に従事している人たちが新しい品種を見つけ出したり、掛け合わせたりして出来上がっているものが、先ほどの確率で、10のマイナス9乗のものがこの放射線の育種を使うことによって、10のマイナス6乗ということで、今まで農業をやっている方々が頑張ってきてきたことが、少し速度を上げて見いだすことができるかと私が感じたのですが、今後例えば気候変動などで、食料の確保が大きな問題になりますと、是非こういう強い品種を、気候変動に対

応できるような品種を作ってってもらいたいと思うのですが、これは日本では余り盛んではなくて、アジアの方に移っていくという考え方でよろしいのですか。

(中川元場長) そうですね。農林省の研究者なんかも気候変動に対する対応というのを、育種で考えています。そのためにスマート農業を使って何とかとか、あるいは例えば温度を上げたような施設を造ったり、そこでこれまでの品種や突然変異を起こした有望系統などを栽培して、そこで一番いいのを探すというようなことをやるのだと思うのですが、やはり一番重要なのはその遺伝資源といますか。だから一番初めに我々がアクセスするのはジーンバンクにある遺伝資源を持ってきて、その中から探すというのがあるのですが、それが無いのだったら人為的に作ってみようじゃないかというのが突然変異育種なのですね。

ですから、その分野でも、私は非常に有効な手段だとは思っています。例えばガンマフィールドやガンマグリーンハウスで照射したものを、問題となっている、例えば夏季に高温になる場所や高温にした人工気象室に植えて暑さに強い個体をスクリーニングして、ゴールド二十世紀の例のように、1個体でも良いから強いものを探せばいいわけですから。例えば、これまで「コシヒカリ」を栽培したときに白濁米になってしまうような場所で、この「コシヒカリ」に放射線をかけた大量のM2種子を栽培しておく、同じ温度でも白濁しないやつが放射線照射集団の中から出てくる可能性がありますよね。そういうのが出たらそれを増やしていけば、何か遺伝子が変わって行って、ゲノム研究でそのメカニズムを明らかにして、ゲノム編集で他品種にも導入する。それは温暖化に対応しているというふうなことは、育種技術としては存在すると思うのですが、やるかやらないかは研究者の確率論みたいなものですから。

(岡田委員) ありがとうございます。

私、最後にですけれども、冒頭、委員長から、今科学技術週間ですという話をしていたのですが、やっぱりこの放射線利用全般は国民の理解が必要なのだろうと思っているのです。いろいろな食品のこともそうですけれども、そういう場合に先生が今までに国民の理解をもっと進めなきゃいけないということで、何か訴えてこられたことってありますかということをお聞きしたい。

(中川元場長) これは非常に難しいところがありましてですね。というのは、いろいろところで、私は一般の人を相手に突然変異育種の話をするのですよ。そのとき、一番初めに何するかというと、ここにリンゴを持っています。これにガンマ線を当てます。「食べたく

ない人、手を挙げてください」と言うと、50人ぐらいいると、やっぱりこわごわ、四、五人が手を挙げるのです。どうして食べたくないですかと聞くと、ガンマ線を当てたらガンマ線が出るじゃないのですか。「いや、ガンマ線は違いますよ。ガンマ線は光と一緒に、当たっているときはあれだけけれども、プチッと電気を切ったら、ここからは何も出ないですよ。真っ暗になるでしょう、それがガンマ線ですよ」というところから始めないといけません。そこでもう駄目になっているわけですよ。ガンマ線がかかっているというだけでも食べない。御存じのように、食品照射に関しては日本は非常にパブリックアクセプタンスがないですよ。

あれこそ、本当に日本なんかは冷蔵庫があるから必要ないかもしれないけれども、アジアへ行ったら、例えば真空パックみたいにして、生肉を入れて、それでガンマ線を当てておいたら、室温条件下でも、品質を変えずにずっとそのまま置いておけるのですよね。いわゆる肉に付いている微生物とかが全部死んでしまうわけです。ですからアジアでは非常に食品照射技術って面白いと思うけれども、日本ではメリットが出てこないですね。これまで御存じのように、ジャガイモの芽を止めた土幌農協のジャガイモがありましたですけれども、あれも昨年で終わったのでしたかね。けれども私はあれは重宝していて、あれは消費者は物すごい助かりますよね。あれ、つくばのスーパーでも売っていて、放射線をかけてありますと標記してありました。買ってきたジャガイモをぽんとここへ置いたって、1週間たとうが2週間たとうが芽が出ないわけですから、そういった意味では消費者に非常にいい技術だと思うのですけれども、あれがなくなってしまったというのも残念だし、それ以外には我が国には食品照射したものは何もないというのですね。

私が場長をしているときも、多分こういう場で食品照射の議論をしたことがあると思うのですけれども、危険だから駄目だという方は出てこないのですけれども、先ほどの話のようにパブリックアクセプタンスになった段階で、「気持ちが悪いですので嫌いだ」と言われたら、これは科学の問題じゃないのです。私が安全だ安全だと言っても、「いや、私は好きじゃないのです」と言われたら、これはもうアクセプタンスを得られない。それをどうしていくかというのは、私も非常に頭を悩ました難しいところです。特に先ほど話したイオンビームですね。私はあれも安全だと思っていますけれども、イオンビームは、ガンマ線の場合は私が今言ったようにリンゴでやって、ガンマ線って何も出ませんと言えます。しかし、イオンビームをやったら、放射化している状態ではこれ食べることができない、それは当たり前の話です。ただ育種というのは種子に照射した場合、それをまた、もちろん

バックグラウンドレベルの種子の話ですが、その1粒の種子を畑に植えると、5千粒ぐらいの種子を作ります。これを選抜しながら、我々研究者が同じ作業を7世代ぐらいやりますから、1世代で5千分の一、2世代目には5千分の一の2乗、3世代で5千分の一の3乗、7世代目には5千分の一の7乗となっていき、その品種になってから、ようやく皆さんの口に届くまでと言ったら、また10世代ぐらいかかっていますね。そうするともう最初に言っていた危ないものがたとえあったとしても、さらに5千分の一の10乗以上になり、検知できないぐらいに薄まっているわけです。そういうふうなことが理解できない人がいて、「いや、一度放射化した種子から出たものは、もう食べてはいけない。」なんて言い出すような一番初め反対派が出てくるのはもうやむを得ないことかなと思います。今回の、「コシヒカリ環1号」は科学的には安全であるだけでなく、農家や消費者に大きな利益をもたらす品種であるわけですから、今後その利点をいかにうまくアピールできるかが重要になると思います。

(岡田委員) ありがとうございます。

(上坂委員長) それでは、畑澤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。よろしくをお願いします。

(畑澤参与) 先生には大変詳細な御説明を頂きましてありがとうございました。

この発表の中でふだん私どもが口にしておいしいおいしいと言って食べているお米とか、ダイズであるとか、多くのものにこの技術が応用されているということがよく分かりました。また、医療の面では低たんぱく質のお米で腎臓病の患者さんの医療にも役立っているということで、大変感銘を受けております。

一つ、最初に確認させてもらいたいと思ったのは、ガンマ線照射はアクセプトされている。それからイオンビームは放射化するというので、まだ十分なアクセプタンスが得られていないのではないかということでしたけれども、この放射化するという意味は、このイオンビームを照射すると照射されたものの中に、放射性同位元素ができてしまうという意味なのではないでしょうか。

(中川元場長) そうですね。それがイオンビームの場合は、我々が種子に照射してもらおうと、半減期の短いものができて放射化しているので、それがバックグラウンド以下になるまで、4時間ぐらいですかね、管理区域から出すことは出来ません。しかし、バックグラウンド以下になったものは、照射していないものと区別が付かないレベルに下がっていると言うことで安全なものです。すなわち、バックグラウンドレベル以下にすると、それは自然界のも

のともう見分けがつかなくなるのですね。自然界では、例えば普通に売られているレタスを食べたら、レタスの中にあるこのカリウムだって一部は放射化しているわけですから、レタスを食べると、人間は胃の内部から放射されます。自然界にも放射性同位元素を含むものが多数あるのに、一度放射化してバックグラウンドレベルになったとしても放射性同位元素を食料にしてはならないというのはナンセンスです。もっと科学的に考えれば、イオンビームで一度放射化したものでもバックグラウンドになればと思うので安全だと私は断言します。

(畑澤参与) 分かりました。そうすると実際これは、放射化されたのを測定して、どのぐらいの量が放射化されているかを評価するというレベルではないのですね。

(中川元場長) 基本的には、だから放射化した核種ですかね、それがどれ以下になっているか、それを調べる方法というのは、ここで線量計を持って行って調べるしかないのですね。最終的に、自然界にあるのと差がありませんというレベルを調べるだけで、確かに何が起きているかというところまでは、正確にやったかどうか、私は知らないですけれども。

(畑澤参与) 分かりました。どうもありがとうございます。

それから、ガンマ線照射というのは、セシウムであるとかコバルト60を使って、低レベルの放射線を長時間ずっと当てていられるという、大変大きなメリットがあると思うのですね。一方、イオンビームであったり、中性子照射は、技術的に長時間連続的にというのはできにくい方法ではないかと思うのですけれども、そういう理解でよろしいのでしょうか。

(中川元場長) ガンマ線も、先ほど言った急照射は、強い放射線、100-1000グレイぐらいを2日間で照射するというのをやりますから、そうするとイオンビームと同じような状態になると想像します。ただ、中性子とかイオンビームでできないのは、ガンマフィールドみたいに成長している植物に弱い放射線を長時間照射して変異を誘発することです。すなわち、ガンマ線急照射やイオンビーム照射は短時間で、種子などにバーンと当てて、それで終わりですよね。しかし、この種子は休眠している状態にあるわけです。ところがガンマフィールドというのは、芽が出ているときからずっと、花が咲くまでずっとフィールド内に置いているわけですから、どこで効いたか分からないけれども、どんどん変異がたまって行って、最後に収穫時になったときに変異が、植物体や種子に蓄積するということができるという利点なのですね。

(畑澤参与) なるほど、分かりました。

それから、例えばイオンビームや中性子照射という方法はガンマ線照射に取って代わるのではなく、方法論的にはガンマ照射と補完的と考えたほうがよろしいのでしょうか。

(中川元場長) もちろんガンマ線の急照射と比べた場合には同じということが言える。先ほど言ったように、イオンビームでもガンマ線と大体同じような変異が出ましたから。ですから、お金がどれだけ掛かるかと計算すると、やっぱりイオンビームはお金が掛かるでしょうね。ガンマ線だったら、たしかコバルト60は、ガンマフィールドは2年に一回の線源交換だったんです。半減期は5年です。そしてガンマルームは4年に一回。そうするとこれら施設の管理のために、ほぼ毎年、変わり交代に線源を交換しているということをやりにながら維持してきました。ただし、こういうふうなコバルト60とかの放射性同位元素の利点は、一遍置いておけば、ガンマフィールドで2年間は使い倒せるわけですよ。夜中であろうが、何であろうがガンマフィールドやガンマルームに置いておくだけで、100点であろうが、1,000点であろうが、1万点であろうが、照射ができるわけですね。イオンビームで1,000点やろうと言ったら、1回の照射ごとに電気代のかかる、その1,000回イオンビームを打たないといけないわけです。そういう意味では確かにコバルト60の価格そのものは高いんですけども、一遍置いておけば、みんなで使い倒せば、回数によっては1照射あたりにかかるコストが非常に安くなるのかなという計算はできるんですけども、それほどみんなが照射依頼しなければ、やはり1照射あたりの単価は高いものになります。

私はガンマ放射線育種場長をしているときも、1回1万円なんて安過ぎるじゃないか。本当に受益者負担にするのだったら、幾らになるかと計算したことがありました。しかし、どんどん依頼照射が減ってくると1人の分のコストが増えてくるような状態になって又依頼照射が減るという悪循環に陥るころが想定され、それはやっぱり好ましくないのじゃないだろうかと思いました。当時は国の研究機関でしたから、何もそれでもうけようというものではないので、そういったところがやはり、独立行政法人になってからの先ほど施設の維持にお金が掛かるといったところの問題点かなと思います。それが1つ稼働さえすれば、その国の育種研究者には大きく貢献し、研究者は助かることになりますので。

(畑澤参与) それで、まとめのスライドの中に放射線育種場のガンマ線照射業務が完全に終了したということが記載されておりましたけれども、この終了したというのは、研究費、維持費、運営費などの費用の問題なののでしょうか。それともニーズの問題なののでしょうか。ニーズはたくさんあるように思うのですけれども。

(中川元場長) 全部合わさったという、その一番大きな理由は、やっぱり東日本大震災のときに、常陸大宮ですから、かなり大きな震度がありまして、ガンマフィールドは、土手が8メートルの高さがありましたから、あれも幾つか壊れたり、それから照射塔がちょっと傾いたりしたから、ガンマ線の飛ぶ角度が変わり、それを修正するのに2年ぐらい掛かりましたですかね。それでやはり老朽化もしています。1960年に最初の母体が出来上がったわけですが、その後ちょっと改修したりしているので、それにしても30年、40年使ってきたわけだから、施設そのものもかなり老朽化している。それがまず一つ。

今おっしゃったように、いろいろな突然変異の技術、イオンビームも出てきたし、それからゲノム編集も出てきたし、それからガンマ線を使わなくても突然変異を出せるというふうな人たちも幾らか出てくる。化学変異原ですね。そういうことで需要が減りつつある。そういったことが全て合わさって、こういう結果になった。

やはりお金のことで言うと、実はコバルト60の線源交換は、かつて原子力予算の補助を受けていたのですよね。私が場長をした当初は3,000万円ぐらいですかね。その予算が競争的資金になって、我々も既に10年ぐらいですかね、競争的資金で予算を頂いて、線源交換ができていたのですけれども、独立行政法人になって、それがなくなったときに、やはり一つの研究室が例えば1年間に3,000万円、施設の維持だけに掛かるわけですよね。これはやっぱり小さくないのですよね。農林省の研究所にしてみると。3,000万円あれば相当大きな研究ができますから。ですから、その後は農研機構になりましたが、よほど私がいた農業生物資源研究所自体が、それをメインに出して何かするという話だったらサポートが得られたかもしれないけれども、メインの研究はそれ以外にも遺伝子組換えの仕事なんかをしている研究所でしたから。その中であって、追い打ちをかけるように、やはり依頼照射の需要が減ったというのはあると思います。

最後の道は、私は海外の人たちに、アジアで、我々はいろいろ講演やトレーニングをしてきましたけれども、彼らが何かの種子を自国から持ってきて、シャーレかなんかに入れて移動させ、蓋を開けずに持ち帰れば、植物防疫上問題なく持ち込むこともできますから、そういう海外のものに対して照射してあげるとか、あるいはガンマフィールドに植えてあげるとか、そういったことが最後の一つの道かなと思ったのですけれども、研究所自体がそういうふうな方向にはいかなかったのですということ。

(畑澤参与) ありがとうございます。最後のパブリックアクセプタンスのところなのですが、最後から2枚目のところに、「MANUAL ON MUTATION BREE

D I N G」ですね、I A E Aから出版された出版物が英語版であるということですが、これを例えば日本語に訳して頒布するとかはどうなのでしょう。効果はあるのでしょうか。

(中川元場長) できると思います。どうなのでしょうかね。私もいろいろなこんな本とか、私は実はバイオマスの研究もしていて、本を出したりしているのですが、日本では少しレアと思っているのですが、バイオマスの方だったら、まだ科学誌、いろいろな人が読みたいと言っているけれども、突然変異育種だけのために、これを記録として置いておくのはいいけれども、それをみんな読んで、教科書にして何かするかという時代はちょっと終わっているような気がします。

(畑澤参与) そうですか。

(中川元場長) 突然変異育種が始まったのは1960年代だったわけです。それはもう幾つか本がありますけれども、日本語でできている本がありますけれども、そのときから大きくは変わっていないですね。増えたものといえば、ゲノムの技術ですね。これまで放射線育種というのは、先ほど森田君のDNA解析でしたように、どんな変異が塩基配列するか、それが見えていなかったものが見えるようになってきた。そうすると突然変異育種がこの左端の「Plant Mutation Breeding and Biotechnology」のSHUさんというのは、実はゲノムの専門家なのです。I A E AのFAO/I A E Aの研究室にいて、今は浙江大学にいますけれども。だからゲノム研究と突然変異育種を合体したりして今は進んでいっているのです。

ですから、そういった意味では、分子遺伝学的技術の大きな技術進歩が拓く側面が加わって、面白いものになります。私が訳せと言ったら、すぐ訳せますけれども、作ってどれぐらい必要があるとか、その辺はちょっとまだ私には自信がないところです。

(畑澤参与) ありがとうございました。私の方は以上です。

(上坂委員長) それでは、上坂から質問させていただきます。

まず、細かいことなのですが、39ページと40ページに、イオンビームとガンマ線で、今回の育種で余り変化が出ないということ。一方、がん治療ですと、エックス線治療と陽子線治療と重粒子線、炭素治療で治療力に、差が出ている。それはブラッグピークという、エネルギー付与の高い領域があるというのが理由の一つだと思うのです。ですから、低、高LET (リニアエナジートランスファー) の違いもある。それなのにどうしてこの育種で効果に変わりがないのはなぜかなと思っています。

例えば39ページで、上の図で見て、ガンマ線による点々がありますね。これはスパー反応領域ですね。これが飛び飛びにできるのがガンマ線です。このたまたま1個の点のところに、37ページにあった遺伝子がばちっと当たると、正に遺伝子に変化ということになる。一方、今度はイオンのケースで下の方なのですけれども、横から、左から右に行く線があって、これがスパーがつながったラインですよ。これが正にその遺伝子にぶち当たると、ここでも変化が起こる。それでその周りにも変化が起こるのですけれどもね。二次的な遺伝子の変化も。育種ではエネルギーが低くなると遺伝子周辺での変化が少ないのかな。高エネルギーで当たると変化が大きいかなという気もするのですけれども、どうなのですかね。がん治療では、明らかにイオンビームの方が、がん細胞の遺伝子を壊す能力が高いみたいなのですね。だけれども、ガンマ・エックス線は物理的効果で直接的に当たって壊す以外に、周りの化学反応もありますね。化学的効果というので、OHラジカルが出てきて、それが遺伝子を壊す。そういうのがある。だけれどもこれに関しては、高エネルギーで一発当たったら、いわゆる物理的効果の方が支配的なのですかね。

(中川元場長) それはいつも、イオンビームをやる人たちが提示する図でして、私は余りその辺詳しくはないのですが、私は放医研の辻井先生とよくあちこちに、原発のあるところに行って講演したことがあるのですけれども、そのときに辻井先生の話聞きながら、何となく私が分かってきたところというのは、やっぱり狭い範囲でエネルギーを当てて、そのときはがん細胞を殺すわけですよ、焼き切るわけですよ。ところが突然変異育種というのはそうじゃなくて、そこまでやってしまわないで、その手前でどこか止めておくぐらいが重要です。そういうものの差は絶対、効果の方ですよ。だから細胞を全部殺してしまうのだったら、それは一番いいでしょうけれども、ガンマナイフみたいに合わせてというのはあるかもしれませんが。それとは突然変異育種は違います。

(上坂委員長) ある特定の遺伝子を切りたいという目的に関しては、その周りの低エネルギーの2次的放射線効果はあまり関係ないかと思いました。

(中川元場長) そうですね。DNAだって、ああいうふうに書いてありますが、染色体が分裂する前や後などは糸玉みたいになってますからね。ああいうふうな状態のときに、放射線が入ってくるとどうなるかとか、割と高い率で逆位ができることは私は面白いと思っているのですけれども。多分DNAの細い糸が1カ所で接近してこんなふうな(親指と人差し指で輪を作った状態)になっている場所があってね、この接近している場所に放射線がぼんと当たったら、朗報の塩基が切れて輪全体がぼーんとなくなって大きな欠失ができるか、この

接している部分で切れて、再度つながるときに、これ逆向きにつながったら逆位になりますよね。だから、大きな欠失と逆位は同じ現象を言っているのかなと思っています。実際の1つの欠失は、1, 2塩基を欠失させるだけですから、実際にはそのような欠失が多いと思います。しかし、結構大きな逆位が出るのですよ。だからそれはやはり糸玉のような状態になっているときに、同じような位置に当てるところで、その巻き方の大きさの関係で小さな欠失と巨大欠失の真ん中の大きさ、例えば1万塩基の欠失が出来にくいということになるのかもしれない。こんな小さな輪というのはないわけだから。そうすると小さな欠失になるか、大きな欠失になるかというのが多く、真ん中辺の大きさの欠失は出てこないというのはそういう理由かなと思った次第です。それは科学的根拠は何にもないんです。

(上坂委員長) 以上、結果的には遺伝的な事実だと思うのですよね。今日教えていただいたのは。

それで今、例えば理研とか、Q S T高崎研では、イオンビームで育種をやられている。全体的な規模の中で、このガンマ線が多分一番大きな貢献と思うのですが、大体の比というのはどのぐらいなのですかね。ガンマ線、イオンビームというと、どのぐらいの規模の差がありますかね。

(中川元場長) 規模というと。

(上坂委員長) 経済規模でもいいのですけれども。

(中川元場長) 経済規模のときには、これはやっぱり何を出すかによるのですよね。突然変異育種は、それが農民や消費者に受けた場合には物すごくヒットする。例えばさっきの腎臓病患者の低蛋白質米は評判が高いのですけれども、私がバイオマス原料用のためにソルガムで作った茎や葉にワックスが出ない突然変異品種なので、誰も買わないかもしれないということもありますから、経済効果の話をするのが難しいかもしれないですね。だからやはりそれは育種をやる人間のアイデアですね。面白いものを見つければ、それは大成功になります。イオンビームでいいのが出ると、やっぱりイオンビーム以外はできないねという話にもなるのですけれどもね。イオンビーム照射で育成した脇芽が出ずに、農家が頂点の花1輪にする作業が軽減できる、「今神（いまじん）」や「新神（あらじん）」はヒットして数千万円規模になっていると聞いています。また、イオンビーム照射で育成した突然変異品種はどんどん増えている状態にあるので、経済効果も大きくなっていると思います。

(上坂委員長) このぐらいの技術を……

(中川元場長) そう。これ5年前だったら10%ぐらいだったと思うのですけれども、5年ぐ

らの間に3%ぐらいポイントが上がりましたからですね。ですからイオンビームがどんどん増えているのは間違いないです。

(上坂委員長) なるほど、分かりました。

それから、今日この技術を社会の方々に分かりやすく説明する機会を作ってください、事例を紹介いただきました。さりながら、日本ですと例えば食品照射はなかなか十分されていないというのが事実で。一方、海外を見ると今日も御紹介されていましたが、我々もFNCAを運営しているのですけれども、それでアジアの国々でこの放射線育種、食品照射までもとても盛んな国があります。ベトナムでは食品照射はもう実用化されて、輸出もしているという状況です。

それで、今後日本にしてもアジアにしても、この重要な技術をどんどん活用していきたいと思うのです。それを説明していくときには、例えば先生がおっしゃられた気候変動に負けない農作物を作っていくとか、それからエネルギーが逼迫するときの食物を保存する方法とか。そういう最近の世界の情勢をしっかりと考慮した上で説明していった方がよろしいでしょうか。

(中川元場長) そうですね。食品照射そのものだけでもやって、最近、私バイオマスとか作物で、「農業と園芸」という雑誌に連載もしているのですけれども、やはり今日本、世界で見たときに、「ネイチャーファースト」といいますか、我々このままの人口増加でいったら、この間、ローマクラブが言ったみたいに人口は指数的に増えていくのに、作物の生産量はいわゆる直線的にしか増えていかない。どこかで人口増に抜かれる。そうすると食料がなくなっていく。そういうふうな話が進んでいったところ、この頃、いや、地球環境がそれこそ、人類が放出する温室効果ガスの30数%は農業が出しているという話になっていっているわけですね。それはなぜかというと、窒素肥料のやり過ぎ。窒素肥料をやり過ぎると二酸化炭素の265倍の温室効果を持つ N_2O というのが出て、それが地球の温暖化につながる。また水田は二酸化炭素の28倍の温室効果があるメタンがいっぱい出ますね。畜産では牛のげっぷからもそのメタンが出てくる。だから農業が今度元凶になって、農業をやるから地球が温暖化していると言う人まで出るぐらいで、そういうふうなときにどこかでバランスを取らないといけませんね。

だから、使い過ぎているところは減らさなければいけないけれども、一方でアフリカでは窒素肥料がなかったら、収量が上がらないわけですね。だからそのちょうどいいところというのをどう探すかというのが求められてくるのですね。足りないところには、今余って

いるところの肥料を持ってくることをすれば、今と同じ温室効果ガスの割合で地球全体の収量を上げていける。そうすると人類をたくさん養える。そういった議論なんかもちよつとやっているのですけれども。そういうふうな視点が、なかなか日本人にバイオエコノミーということが伝えにくい。ヨーロッパなんかは子供のときから教えられているみたいですが、日本では余りそういった地球環境に優しくしようということが教えられていないかもしれないと思います。

このような、温室効果ガス排出を低減するために、突然変異育種を用いて、面白い特性を持つ品種を育成するという新たなプロジェクトがあっても良いかと思います。

(上坂委員長) 例えばこの品種改良も化学的なやり方もあるけれども、それは有害物を排出してしまうわけで、それがエコ的にいいかという問題もありますよね。化学物質を外に放出することは。放射線育種の場合はそれはいいのですよね。

(中川元場長) そうですね。

(上坂委員長) そういうのもありますよね。分かりました。

それから、私も東海村に30年以上住んでいたのですが、ガンマーフィールドの近くをよく通ったのですが、それが今動いていないというのがとても残念と思います。

そういうことの原因の一つが、ガンマ線源のコバルト60とか、セシウム137が非常に価格が高騰しているということで、このガンマーフィールドだけでなく、日本中のRIを使った照射場が、存続が困難だと伺っています。また、医学の方々から、医学用に使う放射線検出器の校正ですね。定期的に校正をやらなければいけないのですけれども、ガンマ線源がもう少なくなってきてできなくなって困っているということで。3月5日の定例会議で、中日本高速道路から橋梁の非破壊検査の話を受けた。その中でエックス線源ですね。エックス線による厚いコンクリートの透視検査という紹介もありました。今、エネルギー1 MeV以下ですと、放射線障害防止法外でして、電離放射線障害防止規則に、準じてやれば、最初に許認可を取れば、あとは自主的管理でいいのです。大きさは1 MeV以下ぐらいですと、数十センチ立方ぐらいの大きさの箱が2つで。あとは据置きの電源と。今日はガンマーフィールドの写真があったと思うのですけれども。そこに入りそうです。エックス線の強度も、数字があるのですけれども、私も計算してみたら、大体同じぐらいの値は出るようですね。

それですので、例えば先ほど医療の校正含めても、RIで厳しいのであれば、電子線型加速器エックス線源という声もあるやに伺って。ここも、このぐらいの大きさであればちよ

うど入ると思うのですね。そういう小型の電子加速器型のエックス線で、方向性があるので、ぐるぐる回したりする必要があると思うのですけれども。それでやって、そして今後の展開のときに、先生は外国の方の人材育成、あるいは外国の照射を日本でともおっしゃっていました。FNCAの議論を聞いていると非常に盛んなのですね。東南アジアの国々ではね。

ここに新しいX線源を持ってきて、国際的コラボの場にして、先生が御提案されていた、いろいろな農業問題を解決するための新しい種を作っていくというのはとても重要な仕事だと思えるのです。先生の感触として、今までずっとRIでやってこられました、小さいX線源があるとして、それで食料問題等々を解決するべく新しい技術の開発等を、やるというのはいかがですか。そういう展開は。

(中川元場長) エックス線の出し方も電気が照射ごとに必要ですよ。コバルト60の交換は、私が場長でいたときに、一回、これ(親指の先)ぐらいの88.8テラベクレルのコバルト60を使っています。これが線源交換ですと3,000万円ぐらいかかります。同じ効果が出るとして、その線源交換の金額と、2年間ずっと電気を使って同じ線量のエックス線を照射し続けるときのコストとか、線量の安定性、さらにエックス線照射管の寿命との比較ですかね。他の方法としては、ここで見せたように、放射線育種場のガンマールームは精巧に出来ていますが、アジアで多いのはガンマセルというドラム缶の中の線源を入れた周りに種子を置いて照射するという原始的な感じのものもあります。放射線育種場のガンマールームは精巧に出来ていて、ちょうどこの部屋ぐらいの大きさなのです。ですからそこに線源があるときに、通常、真下に線源からの距離を測りながら種子を配置して照射できますが、生育中の植物や枝などを遠いところに置いて照射することもできたりして、非常に精密に置かれた位置の線量が分かるのです。ところが何でもいから出せばいいやという話になったら、それこそ原発の炉心でもいわけですよ。置いておけば、何か突然変異ができています。ところが、その起こったときに何グレイかけて、何をしたかというのがわからなければ、突然変異体が出来たとしてもサイエンティフィックじゃなくなてきますよね。そういう意味では、放射線技術のこういう施設というのは、ちゃんと距離を測って、ここだったら2時間やると何グレイってというような分かるわけですから、そういう意味ではいいのですけれども、何でもいから変異出せて言うのだったら、それこそエックス線でも中性子でも、中性子とガンマ線が混入した放射線でも大丈夫です。エックス線利用に関しては、もちろん変異誘発効果はガンマ線と全く同じで、佐賀大学で

育成したダイズの脂肪酸含量の異なる突然変異系統や品種はかなりエックス線で作り出されたものです。

ですから、エックス線とガンマ線はほとんど性質は一緒ですから。あとはコストや線量安定性の比較の問題ですね。施設の大きさであるとか、それを計算したら、私は同じ線量で起きる突然変異の結果は同じだと思います。

(上坂委員長) 分かりました。ありがとうございます。

ほかに、先生方から御質問等ないですか。

それでは、今日は御説明どうもありがとうございました。

それでは、議題1は以上であります。

次に、議題2について事務局から説明をお願いいたします。

(山田参事官) 事務局でございます。

今後の会議予定について御案内いたします。

次回の定例会議につきましては、4月23日火曜日14時から、場所はここ、中央合同庁舎8号館6階623会議室で開催いたします。

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などによりお知らせいたします。

以上です。

(上坂委員長) ありがとうございます。

それでは、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。ありがとうございます。

—了—