

**FNCA2024 放射線加工・高分子改質プロジェクトワークショップ**  
**サマリーレポート**

**2024 年 11 月 5 日 - 11 月 8 日**

**日本・高崎**

**セッション 1: バイオ肥料分野における進捗報告**

1. 放射線分解したキトサンの動物飼料応用、2. ハイドロゲルの医療応用、3. 環境修復、4. 植物成長促進剤 (PGP)、超吸水材 (SWA) およびバイオ肥料の相乗効果、5. PGP および SWA (プロセス開発含む)、6. 放射線による微生物育種、7. 放射線による滅菌および浄化、8. リサイクルプラスチック

**1) バングラデシュ (Dr. Kamruzzaman Pramanik, Bangladesh Atomic Energy Commission)**

**主題: 2**

**ショートサマリー**

キトサン-銀ナノ粒子の抗菌活性を向上させるため、異なる線量で照射しました。その後グラム陽性菌および陰性菌に対するナノ粒子の抗菌活性を測定しました。黄色ブドウ球菌 ATCC 6538 株および大腸菌 ATCC 35150 株に対して抗菌活性の向上が観察されました。濃度が高まるにつれて、抗菌活性も高まりました。

**結果**

キトサン-銀ナノ粒子を調製し、その形成は、UV 可視スペクトルにおいて 410~470 nm の範囲で現れる急激なピークによって確認されました。次にコバルト 60 ガンマ線照射装置を用いて 0、5、10 kGy のガンマ線をナノ粒子に照射しました。次に、照射済みナノ粒子の抗菌活性を寒天平板拡散法を用いて試験しました。黄色ブドウ球菌 ATCC 6538 株および大腸菌 ATCC 35150 株は、それぞれグラム陽性菌とグラム陰性菌の代表として使用しました。抗菌活性の増加が両株に対して観察されました。抗菌活性は、照射済みキトサン-銀ナノ粒子のみに起因し、濃度を高めると、より大きな明確な抑制域が形成されました。

**将来計画**

- i) キトサン-銀ナノ粒子の PVA ハイドロゲルへの照射と取り込み、およびゲルの抗菌活性の評価
- ii) 動物モデルにおける複合ハイドロゲルの生物活性特性の適合性を確認するための動物実験
- iii) 臨床試験と商品化

**主題: 7**

**ショートサマリー**

医療用品および医薬品の電離放射線を用いた殺菌と消毒は、治療行為の安全性と有効性を確保するために極めて重要な側面です。ポストコロナ時代における殺菌と消毒の重要性が高まっていることにより、さまざまな医療・製薬企業からの商業サービスへの需要も相まって、

私たちはこの分野での商業サービスの立ち上げに注力しています。この取り組みの一環として、まずサンプルを収集し、その殺菌に必要なガンマ放射線量を最適化しました。さらに一部の製品については、商業サービスをすでに開始しています。

## 結果

まず、異なるガンマ放射線量 (0~25 kGy) を照射した後のいくつかのサンプル中の総生菌数、総大腸菌群数、総サルモネラ菌数、ブドウ球菌総数を評価しました。しかし TB 以外の増殖は検出されませんでした。その後私たちは、供給されたサンプルの総菌数 (TBC) に注目しました。無菌試験では、放射線曝露後のサンプルを普通ブイヨン内で 14 日間培養しました。スピルリナには 6 kGy、点眼容器、プラスチック製サンプル容器、ガウン、マスクには 5 kGy を照射後、総菌数は観察されませんでした。その他のサンプルは、放射線照射しなくてもカウントを示しませんでした。14 日間の無菌試験の後、点眼容器、プラスチック製サンプル容器、個人用保護具、鼻腔用スプレー、スピルリナ、カモクリームに推奨される最低線量は、それぞれ 10、5、5、5、9、15 kGy でした。

## 将来計画

- ❑ 放射線耐性菌の分離と特性評価
- ❑ 近い将来、いくつかの潜在的分離株の菌株改良
- ❑ 商業用殺菌施設の拡張
- ❑ 局所消毒薬および消毒剤、診断用試薬、非侵襲性医療機器、外装パッケージやラベル、店頭販売 (OTC) 医薬品、医療用ガス容器など、完全な殺菌を必要としない製品の放射線殺菌の範囲の確認

## 2) 中国 (Dr. Ruifu ZHANG, Nanjing Agricultural University)

### 主題: 4, 6

#### ショートサマリー

根発達を促進する *Trichoderma guizhouense* NJAU4742 が分泌するセドレンの同定。*Trichoderma guizhouense* NJAU4742 ベースのバイオ肥料を使用すると、塩類土壌においてイネとトウモロコシが生育し、収穫量が増加しました。SWA を添加すると、細菌 PGPR の土壌生存率と根定着率が増加しました。

## 結果

バイオ肥料株 *Trichoderma guizhouense* NJAU4742 から揮発性化学物質セドレンが同定されました。セドレンは、オーキシシンシグナル経路に依存した方法により側根の発達を促進することができます。この結果は 2024 年に *Cell Reports* 誌で発表されました。バイオ肥料が塩類土壌に施用され、作物の塩分ストレスに対する耐性と最終収穫量は大幅に増加しました。SWA は、キャッサバ澱粉へのアクリル酸の放射線グラフト重合により、室温および標準大気圧で成功裏に調製されました。SWA の膨潤度は 305 g/g です。SWA (バイオ肥料 4 に対し 0.6~1 の割合) をバイオ肥料とともに施用すると、褐色土壌と黒色土壌の両方において、特に土壌の日照り続きの条件下で、土壌生存率、根定着率、バイオ肥料の性能が大幅に向上しました。

## 将来計画

- 1) *Trichoderma guizhouense* NJAU4742 ベースのバイオ肥料の継続的施用
- 2) 温室内および圃場における SWA とバイオ肥料の相乗効果

### 3) 日本 (Prof. OKAZAKI Shin, Tokyo University of Agriculture and Technology)

#### 主題: 4

##### ショートサマリー

日本では、植物の生育を促進する *Bacillus pumilus* TUAT1 を分離し、バイオ肥料として商品化しました。TUAT1 は、ダイズ根腐れ病の原因である *Calonectria ilicicola* を含むいくつかの植物菌類病原体の増殖を抑制できることがわかりました。TUAT1 をオリゴキトサンとともにダイズ植物体に施用したところ、TUAT1 がダイズ根腐れ病の発生を軽減し、ダイズの生育を促進することがわかりました。

##### 結果

東京農工大学（日本、東京）の畑土壌から植物の生育を促進する菌株をスクリーニングして分離しました。そのうちの1つである TUAT1 は、*Bacillus pumilus* と同定され、イネやアブラナ科植物を含むいくつかの植物に対して優れた生育促進活性を示しました。TUAT1 を用いてイネ用の接種材料が開発され、日本では「ゆめバイオ」として商品化されています。

TUAT1 は、寒天培地上で一緒に培養すると、一部の植物菌類病原体の成長を抑制できることがわかりました。異なる植物菌類病原体に対する *Bacillus pumilus* TUAT1 の生物防除活性とメカニズムを理解するために、生物防除スペクトルを評価し、TUAT1 の生物防除剤を特定しました。TUAT1 がいくつかの菌類病原体の増殖を抑制できることがわかりました。その中でも、TUAT1 は、世界で最も深刻なダイズの病気であるダイズ根腐れ病を引き起こす *Calonectria ilicicola* の増殖を強く抑制できることがわかりました。ポット試験では、TUAT1 がダイズ根腐れ病の発病を軽減し、ダイズの生育を促進できることがわかりました。さらに、オリゴキトサンを TUAT1 とともにダイズ植物に追加処理すると、病害防除と種子生産の両方を向上させることができました。

##### 将来計画

さらに、生物防除メカニズムと、圃場でのダイズやイネを含むさまざまな作物へのさらなる応用を理解するために、TUAT1 により生産された生物防除剤を分析します。また温室効果ガス削減や廃水処理に関連する有用微生物の研究も拡大する予定です。

### 4) カザフスタン (Mr. Kassymzhanov Murat, JSC “Park of Nuclear Technologies”)

#### 主題: 5

##### ショートサマリー

花の植え付けにおける高吸着剤の使用に関するモデル試験を実施しました。植え付けの灌漑回数に対する高吸着剤の効果を研究しました。原子力研究所と共同で、高吸着剤を液体放射性廃棄物の処理に利用する可能性に関する研究も行いました。

##### 結果

モデル試験で得たデータのおかげで、クナエフ市の景観整備に高吸着剤を使用するプロジェ

クトを実施することができました。中間モニタリングの結果、生存率はこれまでの期間は平均約 50～60%であったのに対し、約 90%という高い値を示しました。生存率が低いのは、クナエフ市の非常に暑い気候が原因で、夏の平均気温は約 30°C です。

液体放射性廃棄物のための吸着剤選定作業の過程で、吸着剤のランク付けを行いました。その結果、11 種類の吸着剤のうち、シミュレーターを用いた試験で最も優れた特性を実証した 3 種類が、LRW に関するさらなる研究に推奨されました。吸着剤を使用する場合は、溶液から水が吸収されて、塩の形の沈殿物が形成されることに注意する必要があります。液体放射性廃棄物の吸着剤として高吸着剤を使用する可能性に関する研究作業の結果、吸着剤「Superabsorbent」が LRW BN-350 の収着に最も優れた結果を実証したことがわかりました。ただし、その使用における主な欠点は、非固体の「ゲル状」物質が形成されることです。この物質は、原則として、液体状態と比較して LRW の可動性を低下させますが、その後の処理が技術的観点から困難です。

### 将来計画

野菜生産者、温室、苗床、および室内植物、ガーデン、家庭菜園の小売販売を通じて、顧客基盤を拡大する予定です。

## 5) マレーシア (Dr. Phua Choo Kwai Hoe, Malaysian Nuclear Agency)

主題: 4, 6, 7

### ショートサマリー

バイオ肥料 6 製品の商品化が進んでいます。バイオ肥料のマレーシア規格の草案作成が行われています。イネにおけるメタン ( $\text{CH}_4$ ) と二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の排出量に対するバイオ肥料の効果が研究されています。グラム陰性菌とグラム陽性菌の突然変異誘発は完了しており、リン酸塩可溶性微生物 (M100) とケイ酸塩可溶性細菌 (SSB) の突然変異誘発プロジェクトが進行中です。突然変異誘発ガイドライン案 (FNCA) が作成され、ガンマ線殺菌した担体バイオ肥料の開発も進んでいます。

### 結果

2024 年は、バイオ肥料 6 製品 (Bioliqfert、FertiBact AP1、BioNiKPhos、SustainaBac M99、Bioliqfert M100、Beqtoz Microbe Beads) の商品化が進んでいます。

バイオ肥料製品の品質管理計画の一環として、マレーシア農業省とマレーシア標準局が協力して、バイオ肥料のマレーシア規格の草案作成を行っています。

イネにおけるメタン ( $\text{CH}_4$ ) と二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の排出量に対するバイオ肥料の効果に関する研究により、M100 バイオ肥料を使用することで、間断灌漑 (AWD) の下で  $\text{CH}_4$  排出量を 29.83%、 $\text{CO}_2$  排出量を 14.13%削減できることが実証されました。さらに、バイオ肥料は地球温暖化係数を 21.86%削減することができます。

グラム陰性菌とグラム陽性菌の突然変異誘発は完了しており、電子書籍『Guideline on Mutagenesis of Biofertiliser Bacteria Using Gamma Irradiation (ガンマ線照射を用いたバイオ肥料細菌の突然変異誘発に関するガイドライン)』が発行されています。突然変異誘発ガイドライン案 (FNCA) が作成中で、これには加盟国の他の突然変異誘発法や菌類が含まれる予定です。

ガンマ線照射を用いてリン酸塩可溶化微生物（M100）の突然変異を誘発したところ、リン酸塩活性が向上したコロニーが 83 個生じました。リン酸塩可溶化微生物の潜在的な変異体を同定するため、分子法によりさらなるスクリーニングを行う予定です。

ケイ酸塩可溶化細菌（SSB）については、さまざまな作物から合計 16 種の細菌株が分離され、そのうち 3 種の株（*Enterobacter* 種 2 種、*Bacillus* 種 1 種）がケイ酸塩可溶化能力に陽性反応を示しました。

ガンマ線殺菌した担体に詰めたバイオ肥料製品の開発により、ガンマ線照射した発酵消化液担体に植菌した潜在的分離株のうち、分離株 B1 のみが 12 カ月の保存可能期間を有することがわかりました。

結論として、バイオ肥料プロジェクトは、R&D 製品の市場投入に成功し、マレーシアの農業界で受け入れられつつあります。

### 将来計画

バイオ肥料の商品化は、より多くの作物産業にその使用を奨励することを目的としています。バイオ肥料のマレーシア規格の策定と FNCA 突然変異誘発ガイドラインの草案作成が進んでいます。イネにおけるメタン（CH<sub>4</sub>）と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出量に対するバイオ肥料の効果についてはさらに試験を行う予定です。リン酸塩可溶化微生物（M100）の突然変異誘発プロジェクトでは、リン酸塩可溶化細菌において変異体を検出するための対立遺伝子特異的プライマーを開発する予定です。ケイ酸塩可溶化細菌（SSB）の突然変異誘発については、温室条件下でのイネの生育と収量に対する SSB の効果を評価するとともに、SSB 突然変異誘発の LD<sub>50</sub> を測定します。ガンマ殺菌担体バイオ肥料の開発は継続され、ピート、土壌混合物、ゼオライト、発酵消化液など、さまざまなガンマ線照射担体を使った B1 分離株の保存可能期間に関する試験が継続されます。

## 6) モンゴル (Ms. Oyundalai Nyamdorj, Institute of Plant and Agricultural Science)

### 主題: 4

#### ショートサマリー

バイオ肥料、PGP、SWA の併用は、より強く健康的な植物の生育と、環境ストレスに対する作物の耐性向上をサポートします。この相乗効果は、特に水不足になりがちな地域において、持続可能な農業に将来有望なソリューションを提供します。SWA を用いた土壌水分量は、生育期および収穫後期間において、対照区および他の処理区よりも高くなりました。

#### 結果

SWA は土壌の保水力と配水力を高め、有機物の分解を促進するので腐植形成を促します。土壌の腐植含有量は、対照区よりも 0.1~0.7% 高くなりました。土壌水分量は、単独処理および複合処理が対照区よりも優れていることが観察されました。SWA のすべての組み合わせは、生育期および収穫後期間において土壌水分量を 50~80% 増加させました。土壌水分量が改善されたことで、SWA は微生物が繁殖できる環境をサポートします。微生物は、植物や動物の残渣を分解するうえで重要な役割を果たします。土壌の栄養分は植物の生育に利用され、肥料やその他の添加物は栄養分の濃度と収量の増加に役立ちます。

## 将来計画

1. 2022～2023 年の研究結果に基づく 2 種類のバイオ肥料の開発
2. 土壌と植物における根粒菌バイオ肥料の効果の研究

## 7) ベトナム (Prof. Tran Minh Quynh, Vietnam Atomic Energy Institute)

### 主題: 4, 6

#### ショートサマリー

2023 年から、BP Rapol-V は植物防疫局の承認を受けて全国で使用できるようになりました。生産規模の拡大と果樹への適用拡大も計画しています。並行して、ベトナム北部でいもち病やイネ紋枯病の原因となる植物病原体 (*Pyricularia oryzae* と *Rhizoctonia solani*) を制御する潜在的な拮抗変異体をスクリーニングするために、*Trichoderma koningiopsis* VTCC 31435 にガンマ線を照射しました。

#### 結果

バイオ肥料 Rapol-V のスイカの生育に対する効果のフィールド調査が行われています。予備調査の結果は、スイカの収量をわずかに増加させることが示されています。このため今後数年間は、スイカだけではなく他の果樹についても、より広い面積でバイオ肥料の効果进行调查する予定です。

現在の研究により、ガンマ線照射が、微生物変異体を作成する突然変異誘発としての有用な手段であることが改めて証明されました。ガンマ線照射は、特定の放射線耐性コロニーの形態、成長、抗真菌活性に変化をもたらし、イネの一般的な植物病原体である *Rhizoctonia solani* に対する抑制効果の増強につながりました。

*T. koningiopsis* VTCC 31435 の照射コロニーから、植物病原体に対して高い拮抗能力を有する少なくとも 5 つの潜在的な菌株をスクリーニングしました。しかしこの仮説を立証するには、変異体株の分子レベルでの研究が必要です。さらに農業目的の生物防除製品への応用を検討する前に、変異体の実際の有効性を評価するため、フィールド試験は不可欠です。

この研究は、イネの真菌病を制御するためのバイオテクノロジーによる潜在的アプローチを示唆しており、持続可能な農業と作物保護に大きな影響を及ぼす可能性があります。

## 将来計画

1. 大規模生産により Rapol-V の他の作物生産への応用を促進し、コスト削減を図る
2. いもち病やイネの紋枯病の原因である植物病原体に対する活性を調査するための、高い拮抗能力を有するトリコデルマ変異体 VTCC(a) I-1 の遺伝的安定性
3. 植物の生育促進と、植物の疾病を抑制する拮抗微生物で構成される新しいバイオ肥料の開発

## Session 2: Progress Report on Polymer Modification

### 1) バングラデシュ (Dr. Salma Sultana, Bangladesh Atomic Energy Commission)

#### 主題: 3

#### ショートサマリー

繊維染色業界では、染料を含む大量の廃水が発生し、それらは直接周辺の水路、農地、灌漑用水路、地表水に排出されています。これらの廃水は、水生環境の物理的、化学的、生物学的特性に変化をもたらし、公衆衛生、家畜、野生生物、魚類、その他の生物に有害な変化をもたらす可能性があります。このため繊維染色廃水による環境劣化はバングラデシュで大きな問題となっています。これらの事実を踏まえ、多くの研究者は、沈殿、イオン交換、活性炭吸着、電解法などの技術を用いて、廃水から染料や金属を除去しています。しかしこれらの方法には、コストが高い、除去率が低い、再生が難しい、再利用などの限界があります。このため多くの研究者は、吸着剤として低コストで効果的な代替ハイドロゲルに注目しました。ここで私たちは、染料や金属を水溶液から吸着する吸着剤として、ガンマ線照射によるハイドロゲルを開発しました。

#### 結果

メチレンブルー (MB)、コンゴレッド (CR) の染料を水溶液から除去するためにCo-60線源からのガンマ線照射を適用することにより、一連のCMCh/AAm/DADMAC/MBAハイドロゲルを調製しました。Langmuir等温線モデルが、メチレンブルーの吸着に対して高い相関 ( $R^2 > 0.98$ ) で最もよく適合し、Freundlich等温線モデルがコンゴレッドに対して最もよく適合する ( $R^2 > 0.97$ ) ことが観察されました。CMCh/AAm/DADMAC/MBAハイドロゲルの吸着挙動は擬二次運動モデルに従っており、最大除去効率MBについて約87%でしたが、CRについては91%でした。

水溶液からメチレンブルー (MB) とコンゴレッド (CR) 染料を除去するためCo-60線源からのガンマ線照射を適用することにより、一連のスターチ/リグニン/DMAハイドロゲルを調製しました。Freundlich等温線モデルが、メチレンブルーの吸着に対して高い相関 ( $R^2 > 0.98$ ) で最もよく適合し、コンゴレッドに対してはFreundlich等温線モデルが最もよく適合する ( $R^2 > 0.97$ ) ことが観察されました。スターチ/リグニン/DMAハイドロゲルの吸着挙動は擬二次運動モデルに従っており、最大除去効率はMBについて約92%でしたが、CRについては69%でした。

産業廃水 (種1) の場合、Na-Alg/PVP/DMAおよびCMCh/AAm/DADMAC/MBAブレンドハイドロゲル、3日後の除去効率はそれぞれ約41%と約21%、10日後はそれぞれ57%と23%でした。産業廃水 (種2) の場合、Na-Alg/PVP/DMAおよびCMCh/AAm/DADMAC/MBAブレンドハイドロゲル、3日後の除去効率はそれぞれ約41%と約22%、10日後はそれぞれ43%と8%でした。

#### 将来計画

調製済みハイドロゲルの染料および金属の吸着特性を高めることを試みて、繊維および産業廃水に応用します。

#### 主題: 8

## ショートサマリー

テレフタレートポリマー、すなわちPETの膨大な量の廃棄物は、重大な環境問題の原因です。リサイクルの一般的な方法の1つは、コンクリート技術において廃棄物を充填材として使用することです。しかし廃ポリマーの導入により、廃ポリマーとセメントペースト間の接着強度が弱まり、機械的特性が低下します。これに対処するもう1つの方法は、放射線を利用することです。このため、廃ポリエチレンテレフタレート (PET) とガンマ線照射がセメント系コンクリートの圧縮強度 (CS) に及ぼす影響について研究が進んでいます。

## 結果

砂利、砂、セメント、PETパウダーを使用してコンクリートブロックを調製し、万能試験機を使用して機械的強度試験を行っています。まず製造工程で、事前に設定したセメント、砂、砂利を2:3:5の比率で、砂の代わりに0.5、1、1.5 gの照射済みおよび未照射のPETを使用しました。次に、0.5、0.25、0.25未満の砂利の大きさを使用して、砂利の大きさを最適化しました。砂利の大きさが0.25 mm未満の場合、対照、照射、未照射のコンクリートは、他の大きさの砂利と比べて高い圧縮強度を示しました。砂利の大きさ (0.25 mm未満のパンサイズ) を選択した後、セメント、砂、砂利の異なる比率1.8:3:5、2.2:3:5、2.4:3:5を使って、砂を0.5、1、1.5 gの照射済み、未照射PETと再び置き換えました。セメント、砂、砂利の比率が2.2:3:5の場合に良好な結果を示しました。さらにこの場合、照射済みコンクリートの圧縮強度は、未照射のコンクリートブロックよりも高くなりました。得られた圧縮強度の最大値は18 Mpaでした。これらの実験ではすべて、50 kGyの放射線量を使用しました。

## 将来計画

現在 PET ペレットを使っていますが、PET フレークも使用する計画で、両者間の比較評価を行う予定です。ブロック内の PET の量を 1.5%以上増加させるよう取り組みます。加工性、空気含有量、引張強度、吸水量など、コンクリートブロックのその他の特性を調査します。また SEM、XRD、FTIR により照射済みおよび未照射 PET を調査します。

## 2) 中国 (Dr. Hongjuan MA, Shanghai University)

### 主題: 3

## ショートサマリー

照射技術を使った高分子修飾と、ウラン抽出、太陽光を利用した海水淡水化、難分解性有機汚染物質の分解、マイクロプラスチックの効率的な処理におけるその応用の研究プロジェクトが進行中です。電子線 (EB) と  $^{60}\text{Co}$  を使った照射技術は、中国では市場が大きく需要が高いため、今後も継続的な成長が続くでしょう。従来の放射線加工用途に加え、放射線硬化が特に注目されています。放射線技術に基づく新素材は、将来的に幅広い応用空間があります。

## 結果

1. 高い蒸発能力を有する共有結合型ポリアニリン (PANI) ベースの光熱変換ファブリックを調製するための3段階のルートが提示されました。グラフト化された PAA または PAM は PANI にドーピング効果を示し、その結果、得られた PANI 修飾綿ファブリックの光電応答および光熱変換能力が向上しました。この研究は、共有結合ドーピングによる導電性高分

- 子ベースの光熱素材の性能向上に新たな戦略を提供しており、高性能光熱素材の開発を促し、海水からの資源回収への太陽光を利用した蒸発の応用を普及させる可能性があります。
2. ウラン (U) 吸着の向上と材料コストの低減を目指して、PAN の電子線照射有機グラフト重合と、ビニロン・コットン混合 (VCM) ファブリックのアミドキシム化、およびその後のピロール-2-カルボキサルデヒド (P2C) 染色により、光熱 AO ベースの繊維吸着剤を調製しました。吸着能は暗所よりも 15~20%増加し、P2C 染色と太陽光照射により吸着能が明らかに上昇したことがわかりました。この研究では、バッチ処理における低コストの光熱 AO ベースの繊維剤製造へのシンプルで実用的なルート、および海洋ウラン採掘の低炭素戦略を発表しています。
  3. 高分子量ポリアクリロニトリル (HMWPAN) 繊維は、事前膨潤と共照射誘起グラフト重合技術によって経済的に効率的で高性能なウラン抽出材料を調製するために利用されました。AN のモノマー利用率は 70.29%に達し、従来の方法を大幅に上回りました。この方法には、モノマーの利用率が高い、後処理が簡素化される、材料性能に優れている、ホモポリマーの形成が最小限など、複数の利点があります。これらはすべて生産コストの削減に寄与します。
  4. PFOS および PFOA は、EB によって生成された  $\text{eq}\cdot\text{H}$  によって継続的に攻撃され、PFA の脱フッ素化、および PFHxA、PFPA、PFBA などの他の短鎖パーフルオロカルボン酸の形成につながります。
  5. 中国の産業用電子加速器は急速に発展しています。電子加速器のエネルギーは幅広い範囲をカバーしています。応用シナリオは主に、ケーブル、薄膜、タイヤ、熱収縮チューブ、シート、食品や医療製品の殺菌などの側面に焦点を当てています。

### 将来計画

1. より高い能力、高速吸着運動を伴う新しいウラン抽出材料の研究開発を継続し、材料のパイロット規模 (100 kg) とウラン抽出の海洋試験 (1 kg) を実施します。
2. 個々の兵士や漁師の飲料水問題を解決するために、海水淡水化装置を組み立てます。
3. 放射線硬化などの産業開発のため、電子加速器メーカーと協力します。

### 3) インドネシア (Dr. Farah Nurlidar, National Research and Innovation Agency)

主題: 1, 8, 7

#### ショートサマリー

放射線加工技術を使った高分子修飾に関する研究開発 (R&D) は、インドネシア国立研究革新庁 (BRIN) 原子力研究機関放射線加工技術研究センターで実施されています。オリゴキトサンを動物用添加飼料とする研究は、パジャジャラン (Padjajaran) 大学と PT Pandu Agrolestari が共同で実施しました。

プラスチックのリサイクルに関する別のプロジェクトは、インドネシア大学、インドネシアプラスチックリサイクル協会 (ADUPI)、PT Viro が共同で実施しました。現在この研究の技術習熟度レベル (TRL) は 5 です。

別のプロジェクトでは、超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) ベースの複合材料の機械的特

性に及ぼすガンマ線と電子線照射の影響を調査しています。その結果、50 kGy までのガンマ線照射は、複合材料の機械的特性を低下させる傾向にあることがわかりました（ただし有意ではありません）。

## 結果

1. 新興企業 PT Ecomara Pandu Inovasi には、BRIN から資金調達するための提案書を提出する資格がありませんでした。企業に対するその要件が設立 3 年以内であったためです。現在同社の人々は PT Pandu Agrolestari という新会社を通じて新たな提案書を提出する予定です。しかし彼らはオリゴキトサンのテーマを動物用添加飼料から農業用添加物に変更したいと考えています。農業用添加物の市場潜在力は動物用添加飼料のそれよりも高いことが研究でわかったからです。2024 年内に提案書が提出される予定です。
2. 照射済み PE から相溶化剤を開発する計画は TRL 4 をクリアしました。現在 PT Viro は照射済み PE の相溶化剤を使って大規模な（50 kg）実験を行っています。照射済み PE 製の薬の相溶化剤としての機械的特性を測定したところ、市販の相溶化剤に比べて良好な機械的特性を示しました。
3. 別の研究では、超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）ベースの複合材料の機械的特性に及ぼすガンマ線と電子線照射の影響を調査しています。UHMWPE、キトサン、ヒドロキシアパタイトを含む複合材料。この複合材料の成分間の界面接着を強化するために、表面修飾 UHMWPE を使用しました。その結果、50 kGy までのガンマ線照射は、複合材料の機械的特性を低下させる傾向にあることがわかりました（ただし有意ではありません）。しかし表面修飾 UHMWPE から作られた複合材料の機械的特性は、UHMWPE から作られた複合材料よりも大幅に小さいです。このためこの研究では、UHMWPE 内に酸化基を生成するためにガンマ線／電子線を使って UHMWPE を修飾して、UHMWPE を、キトサンやヒドロキシアパタイトなどの疎水性化合物と相溶化することができます。

## 将来計画

- PT Pandu Agrolestari が、研究ベースの新興企業を通じて、オリゴキトサンを動物用飼料添加剤としてダウンストリームするため BRIN から資金調達を得るのをサポートします。
- 木材プラスチック複合材料で使用される照射済みリサイクル PE から生成された相溶化剤の開発の TRL 5 達成を継続します。
- UHMWPE ベースの複合材料の殺菌に及ぼすガンマ線と電子線照射の影響に関する完全なデータシートの入手を継続します。

## 4) Japan (Dr. TAGUCHI Mitsumasa, National Institutes for Quantum Science and Technology)

### 主題: 2, 3

### ショートサマリー

当研究の目的は、放射線電離により極めて独創的で機能的なバイオデバイスを創出することです。放射線の独自性と優位性を活用することにより、生体材料の微地形や物理的・化学的特性を nm から  $\mu\text{m}$  まで自在に三次元制御することができます。現在は三次元細胞培養基材や、生体適合性ポリマーをベースとするナノセンサーなど、最先端の医療機器の研究開発を

行っています。

## 結果

### 1) スマートゼラチンナノ粒子

ゼラチン水溶液にガンマ線を照射し、放射線架橋技術により平均粒径 5～20 nm のナノ粒子を生成しました。ゼラチンナノ粒子は  $^{64}\text{Cu}$  で標識され、負の表面電位を示しました。次にすい臓腫瘍を患うマウスにナノ粒子を注入することにより、ナノ粒子を生体内で評価しました。注目すべきことに、ナノ粒子は腫瘍内に蓄積しました。 $^{64}\text{Cu}$  で標識されたゼラチンナノ粒子は、すい臓がんの次世代 PET 造影剤のプラットフォームとして有望です。

### 2) 環境に優しいバイオ材料

ヒドロキシプロピルセルロースをベースとした透明性の高いハイドロゲルを、電子線を使った放射線架橋技術により調製しました。照射線量と添加モノマーの種類を最適化することにより、機械的強度や透明性などの優れた物理化学的特性と、リゾチーム沈殿物が少ないことや生分解性などの生物学的特性が得られました。生成されたハイドロゲルは、ヒトや環境に優しいソフトコンタクトレンズ素材として使用できる可能性があります。

## 将来計画

医療用途の機能性バイオデバイスを開発するため、放射線架橋技術を研究しています。具体的には、創薬や再生医療のための 3D 栽培培養ハイドロゲル、診断用ナノセンサー、迅速かつ正確な薬物評価のためのマイクロ流体チップを開発し、実用化することを目指しています。

## 5) カザフスタン (Mr. Nurkassimov Azat Kanatovich, JSC “Park of Nuclear Technologies)

### 主題: 3

#### ショートサマリー

研究作業では、ELV-4 電子加速器での放射線法により変性した PE-100 ポリマーの構造および物理的、機械的特性の変化の依存性を研究し、変性ポリマーの熱的特性の放射線量に対する依存性が得られました。

## 結果

放射線治療中の PE の空間ネットワーク構造の形成パターンが確立されました。比較参照サンプルでは架橋の程度は約 70%ですが、変性プロセス後、同数値は約 80%です。

定ひずみモードにおけるさまざまな方法で架橋したポリエチレンパイプサンプルの緩和プロセスを研究しました。放射線架橋 PE の 90°C および 110°C における緩和率定数は、比較参照サンプルよりも高く、これにより特性の安定性が増し、内部応力レベルが低下することがわかりました。

長期試験結果の分析に基づき、架橋 PE パイプの推定耐用年数を確立し、実験室および実物大の試験を実施して規制文書と技術文書を作成しました。95°C までの温度における推定圧力に対して大きな安全裕度を特徴とする放射線架橋給湯・暖房パイプの工業生産が確立されました。

## 将来計画

得られた結果に基づき、給湯用変性パイプの生産を確立する予定です。

JSC Science Fund からの補助金交付の枠組み内で産業用機器の購入を計画しています。  
科学論文の査読付き学術誌への掲載準備も進めています。

## 6) マレーシア (Ms. Maznah Binti Mahmud, Malaysian Nuclear Agency)

主題: 1, 4, 5

### ショートサマリー

ガンマ線照射は、KitoGama、CarraPGP、SWA-sago の調製に利用されています。これらの製品の製造プロセスは確立されており、水産養殖や農業への応用の可能性が実証されています。高品質な最終製品を確実にするため、進行中の研究は、製品の安定性と性能の評価に重点を置いています。効率性試験については、農業をバックグラウンドとする専門家とのさらなる協力や提携を推進するべきです。このような取り組みを行うことは、製品の効果的な販売促進に役立つでしょう。

### 結果

KitoGamaは、キトサンをベースとする動物用飼料添加物で、特に唐辛子、トマト、ナス、空心菜（エンツァイ）などの作物を使ったアクアポニックスシステムで有望な結果を示しています。KitoGamaを適用した結果、窒素（N）、リン（P）、カリウム（K）の栄養レベルが、AB肥料ではそれぞれ142 ppm、260 ppm、479 ppmであったのに対し、224 ppm、329 ppm、502 ppmに増加しました。さらに、KitoGamaを使用した場合の電気伝導度（EC）の値はAB肥料と比較して高くなりました。

25 kGyで調製したSWA-sagoは、最も高い膨潤能力を示しました。このSWA-sagoをさまざまな持続時間で浸漬して、その後Sacha Inchiの種子の発芽試験に使いました。その結果、3時間、6時間、12時間浸漬した後、SWA-sagoは追加的に散水を行うことなく最長27日間、種子の発芽に十分な水分を供給しました。具体的には、3時間の浸漬時間で、処理の6日目までに種子の発芽が始まりました。

照射線量が増加するにつれて、カラギーナン溶液の pH は低下しました。さらに、これらの溶液に保存料を添加すると、pH はさらに低下しました。植え付け用培地の強酸性条件は栄養不足につながり、種子の発芽や生育を妨げます。この問題を軽減するために、CarraPGP の pH は約 5 に調整されています。CarraPGP は平均分子量が約 9.43 kDa で、発芽率、種子の生存率、植物の高さ、乾燥バイオマスにおいて著しい改善を示しました。一方で分子量が 3.18 kDa のカラギーナンは、成長促進活性の低下を示しました。

### 将来計画

- a. NGOと提携した実験と実地試験の実施
- b. アグロテック（農業技術）部門の研究者と協力した、現地の農業慣行に沿った生産性を向上させる製品応用方法の開発
- c. 有機肥料とCarraPGPを使用した稲作におけるメタン（CH<sub>4</sub>）と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出量に対するバイオ肥料の影響調査
- d. 製品の調製と応用に関する標準作業手順の開発
- e. 製品拡大と商品化の取り組みのための潜在的な顧客の特定

## 7) モンゴル (Dr. Chinzorig Radnaabazar, National University of Mongolia)

### 主題: 7

#### ショートサマリー

現地で生育したジャガイモに、低エネルギーX線をさまざまな低線量（最大 200 Gy）で照射しました。片面照射を行い、本研究ではジャガイモ内の線量均一性は考慮しませんでした。別の研究では、低温保管中であっても、実際に低線量照射によってジャガイモが腐敗しやすくなることが示されました。この理論を試験するために、照射したジャガイモと未照射のジャガイモの両方を室温（22°C）で培養しました。測定可能な物理的、機械的、生化学的変化を含む、2つのグループ間の有意な違いを観察しました。この結果に基づき、ジャガイモを室温で保管する前に、品種「ガラ」には 150 Gy の X 線照射が最も適していると推測できます。

#### Method and materials:

形がよく、傷がなく、固く、比較的きれいなジャガイモ（*Solanum tuberosum* 'L（ナス科）、品種「ガラ」）を4つのグループに分けて、そのうち3つのグループに RS 1800 Q4 X 線照射装置を使って 100 Gy、150 Gy、200 Gy の線量を照射しました。照射したサンプルは 60 日間室温で培養し、ジャガイモそれぞれの重量、長さ、幅、芽、緑色および褐色部分の変化を、MNS 0258:2021 規格に従って測定しました。各グループで総糖度、溶解固形分、pH を測定して比較しました。この研究では、X 線細胞照射装置 Rad Source RS1800 を使用しました。これは、コンパクトな自給式細胞照射研究システムとして設計されたもので、40～160 kV の電圧で動作します[3]。PTW Unidos 10002 電位計と PTW30004 電離箱を使って線量マッピングを実施すると、メーカーが提供する基準値との良好な一致を示しました。

#### 結果

同程度の照射レベルに曝露した場合でもジャガイモの発芽には顕著な違いがあります（図 4 参照）。対照群では、ジャガイモ 1 個あたりの芽の平均数は  $7.25 \pm 1.25$  であったのに対し、150 Gy 群では平均  $4.17 \pm 1.01$  でした。発芽における最も顕著な違いは対照群で観察されましたが、4 mm を超える長さの芽の平均数は  $2.88 \pm 0.88$  でした。これは照射したジャガイモ群では生じなかった現象です。ジャガイモの発芽が 5% を超えると、モンゴル規格 MNS 0258:2021 に従って不合格となります。照射群および未照射群の pH は、60 日間室温で保管した後 pH 5.1～5.9 の正常範囲内にありました。

TPA の結果に基づき、60 日間保管した後の対照群のジャガイモの硬度は、照射したジャガイモ群と比較して 40～50 N 低く、粘性も 10～20 N 低いことがわかりました。一方で、穿刺力はすべての群でほぼ同じでしたが、仕事量、穿刺ストローク、ヤング率の値は、対照群と照射群で大きく異なりました。たとえば、対照群の「作業量」パラメーター値は、他の群と比較して 20～50 mJ 高くなりました。また穿刺ストロークも対照群の方が 2 mm 長くなりましたが、対照群の弾性係数は 1000～2000 Pa 低くなりました。その結果、異なる線量の照射後に室温で 60 日間保管したジャガイモの特性は、未照射のものとは異なると結論づけることができます。

#### 将来計画

- a. 基本野菜（ニンジン）の収穫後照射処理による保存中の損失削減

- b. 衛生と防疫を向上させるための食肉処理
- c. 農家や中小企業の支援と教育、原子力技術情報を安全なものとして公衆に提供

## 8) フィリピン (Dr. Charito T. Aranilla, Ms. Lorna Relleve, Philippine Nuclear Research Institute)

### 主題: 2

#### ショートサマリー

##### 1. CMC 止血剤

CMC 止血剤の臨床試験プロトコルは、イースト・アベニュー医療センターと V. ルナ医療センターの倫理審査委員会から承認を得ました。FDA の承認は、臨床試験を実施するための次のマイルストーンとなります。CMC 止血剤の初期パイロット生産が FDA 認証施設で実施され、FDA 医療リスト認証用にサンプルが準備されて臨床利用に限定されました。

##### 2. 薬物送達と創傷治癒のための CMHA ハイドロゲル

カルボキシメチルヒアルロン酸 (CMHA) ハイドロゲルは、ガンマ線と電子線の照射により合成されました。その特性は、刺激応答性の膨潤挙動を含めて特性評価されました。結腸を標的にした薬物送達と創傷治癒への CMHA ハイドロゲルの潜在的な応用が現在研究されています。

#### 結果

##### 1. CMC 止血剤

1 バッチあたり 50 kg のペーストを 25 kg ずつパウチ包装した CMC 止血剤のパイロット生産を開始しました。サンプルには 40 kGy のガンマ線を照射しました。ゲルの分率と膨潤度はそれぞれ 39%と 370 g 水/g 乾燥ゲルでした。顆粒を注入したガーゼの製造デモンストラーションは、委託メーカーに実施済みであり、200 個の顆粒注入ガーゼの準備がまもなく開始されます。

##### 2. 薬物送達と創傷治癒のための CMHA ハイドロゲル

CMHA ハイドロゲルは 40%と 60%の濃度で調製され、40~120 kGy の線量で 40~65%のゲル分率を達成しました。超低線量率 (0.5 kGy/時) では、10%または 20%の濃度でハイドロゲルを形成することができませんでした。しかし電子線照射とガンマ線照射を 2 kGy/時で使用した場合は、20%の濃度でハイドロゲルの形成に成功しました。FTIR および TGA の分析により、高線量におけるハイドロゲルでいくつかの構造変化が明らかになりました。ハイドロゲルは乾燥ゲル 1 g あたり 40~2400 g の水という卓越した膨潤能力と、pH と塩に反応する膨潤挙動を示しました。細胞毒性試験では、60 kGy および 120 kGy で調製した CMHA ハイドロゲルがほぼ 100%の細胞生存率を示し、優れた生体適合性を有することがわかりました。CMHA ハイドロゲルの薬物送達への応用は、モデル薬としてジクロフェナクで開始されました。その結果、CMHA ハイドロゲルの薬物負荷容量とインビトロ薬物放出プロファイルは、他の機関が開発したハイドロゲルのそれと同等であることがわかりました。一方、創傷治癒への応用のための分解研究を、ガンマ線照射を用いた 1%溶液で行いました。100 kGy では約 4000 Da の分子量が得られました。線量を 200 kGy に増やしても分子量はそれ以上減少しませんでした。細胞毒性試験では、CMHA オリゴ糖が 70%を超える細胞生存率を示し、優れた生体適

合性を有することが示されました。抗酸化活性は照射線量の増加に伴い高まりますが、アスコルビン酸の方が高い抗酸化特性を有しています。

#### 将来計画

##### 1. CMC 止血剤

- パイロット生産試行の継続
- 殺菌線量としての 25 kGy の検証と立証
- パイロット臨床試験の開始

##### 2. CMHA DDS

- ジクロフェナクに関する薬物送達研究の継続
- オキサリプラチンや 5-フルオロウラシルなどの化学療法薬に関する研究の開始
- 血管新生と創傷治癒試験のアウトソーシング

#### 9) タイ (Dr. Kasinee Hemvichian, Thailand Institute of Nuclear Technology)

##### 主題: 5

##### ショートサマリー

以前に SWA ハイドロゲルの調製に成功しました。フィールド試験の結果、調製された SWA は乾燥地域に植えられた若いゴムの木の生存率を最大 40%増加させるのが可能なことが明らかになりました。しかし、SWA ハイドロゲルの製造に使用される方法は多くの時間とエネルギーを消費する一方で、製造される SWA ハイドロゲルの大きさと形状は不規則です。この研究は、均一な大きさと形状の SWA を製造する新たな方法を開発することを目的としています。

##### 結果

均一な大きさと形状の SWA を調製する新しい方法が開発されました。SWA ビーズの調製は、アルギン酸-キャッサバ澱粉ビーズへの AA の放射線グラフト重合によって成功しました。調製された SWA ビーズは、360 g/g という高い膨潤率でした。この研究の結果、この新しい方法はエネルギーと時間を節約しながら、均一な形状と大きさの SWA ビーズを調製できることが証明されました。

##### 将来計画

1. SWA ビーズの農業応用の可能性を分析するためフィールド試験を実施中
2. 植物成長促進剤 (PGP) から他の用途へのキトサン利用の拡大 (精油のカプセル化用キトサンビーズ、動物用飼料用の低分子キトサン、キトサンベースのコーティングフィルム)

#### 10) ベトナム (Prof. Nguyen Ngoc Duy, Vietnam Atomic Energy Institute)

##### 主題: 3, 8

##### ショートサマリー

- ロブスター漁の網から出るプラスチック廃棄物を、Co-60 ガンマ線照射により機械的特性を強化して高密度ポリエチレン (HDPE) と組み合わせてリサイクルしました。ガンマ線照

射をさまざまな線量（15、20、25、30 kGy）で行ったところ、15 kGy の線量がプラスチック廃棄物の機械的特性を最適化することがわかりました。次に照射したプラスチックをバージン HDPE と 10:90、20:80、30:70 の比率で混合しました。その結果、20:80（廃棄物対バージン HDPE）の混合が最も優れた特性を示しました。

- この研究では、2 つの照射方法を用いて PVD-g-AAc（アクリル酸で重合したポリフッ化ビニリデン）膜を調製し、特に銀（Ag）と銅（Cu）で修飾してその特性を向上させることを説明しています。これらの PVDF-g-AAc-Ag 膜と PVDF-g-AAc-Cu 膜は、特に大腸菌に対して著しい殺菌効果を示しました。PVDF-g-AAc/AgNP（銀ナノ粒子）膜の強力な抗菌性能を踏まえると、水処理への応用が期待されます。

## 結果

- この研究は、Co-60 ガンマ線照射によりリサイクル素材の機械的特性を強化することで、特にロブスター漁の網などの水産養殖から出るプラスチック廃棄物のリサイクルに焦点を当てています。リサイクルした HDPE プレート異なる線量（15、20、25、30 kGy）の Co-60 ガンマ線に曝露させました。試験した線量のうち、15 kGy が架橋に最適な線量であることがわかり、最も優れた機械的安定性を示しました。15 kGy で照射したリサイクル HDPE を、バージン HDPE と 3 種類の異なる比率（10:90、20:80、30:70）で混合しました。これらの混合物を試験して、機械的性能に最適な組み合わせを決定しました。それぞれの混合比率について、メルト・フロー・インデックス、衝撃強度、曲げ強度、引張強度などの機械的特性を評価しました。20:80 の混合比率（リサイクル HDPE 対バージン HDPE）が、機械的特性の最適な組み合わせを示し、リサイクル HDPE 製品の潜在的な商業利用に適していることがわかりました。
- 製造した PVDF-g-AAc 膜は、放射線量 20 kGy で 5 時間の前照射法で、AAc 重合率 1.5% を達成し、放射線量 10 kGy での同時照射法で AAc 重合率 22% を達成しました。本研究における PVDF-g-AAc 膜は、銀ナノ粒子（AgNP）および銅ナノ粒子（CuNP）で官能化され、含有量は AgNP で重量比 4.21%、CuNP で重量比 0.58% と測定されました。AgNP を埋め込んだ PVDF-g-AAc 膜は高い抗菌効果を示しました。2 つの試験方法において、それぞれ 89.49%、98.99% の抗菌効果率を示し、高い殺菌効果があることがわかりました。CuNP 膜は、2 つの方法で 27.62%、38.53% という低い抗菌効果率を示しました。この結果は、AgNP を埋め込んだ PVDF-g-AAc 膜が、CuNP を埋め込んだものよりも、水処理や医療用ろ過など、高い抗菌活性を必要とする用途に適していることを示しています。

## 将来計画

- 電子線法による病院廃水処理に関する研究
- リサイクルを目的として、照射を利用したプラスチック廃棄物（メッシュ廃棄物）の機械的特性の向上に関するパイロット研究
- 医療用途のための天然高分子の電子線照射法によるナノゲル化に関する研究