

加速器施設の突然変異育種利用 – 重イオンビーム育種技術の開発 –

阿部 知子

理化学研究所仁科加速器科学研究センター イオン育種研究開発室

物理学者 Röntgen は 1895 年 X 線を発見し、1901 年第 1 回ノーベル物理学賞を受賞した。Muller は 1927 年 X 線によるショウジョウバエ突然変異体を発見し、1946 年ノーベル生理学・医学賞を受賞した。植物では、Stadler が 1928 年トウモロコシやオオムギの突然変異誘発を示した。日本では、1939 年サイクロトロンで発生する中性子線によるショウジョウバエの突然変異誘発、1941 年 X 線による一粒系コムギの早生変異体選抜などがあり、放射線育種場に 1961 年ガンマーフィールドが完成、照射を開始した。育成した直接利用 127 品種のうち、最も品種数が多い植物種はキクの 38 品種である¹⁾。その後、新しい放射線について、1990 年からイオンビームを、2008 年から佐賀県農業試験研究センターが放射光を、品種改良技術として開発している。

イオンビーム（粒子線）は、原子から電子をはぎとった原子核（イオン）を加速器で高速化したものである。細胞を通過するとき、その飛程に DNA があると切断する。イオンには質量と電荷があり、物質に与えるエネルギーが大きく、一粒でも DNA 二本鎖を切断し修復が難しい損傷を与え変異を誘発する。世界に 6 つある品種改良を目的に大気中で植物への照射を実施している加速器施設うち 4 つが日本にあり、世界を先導する技術である。育成した新品種（直接利用）は花き植物を中心に 60 を超え、対象品目は食用作物、薬用植物、微生物や海洋生物に広がっている。従来、放射線照射では半致死線量で変異体を選抜してきたが、目的以外の有用な形質への影響を低減するには低線量照射が望まれる。炭素イオンや放射光では低線量照射においてキクで高い変異率を得ている（表）^{2,3)}。一方、近年 DNA シーケンサーの性能向上に伴う配列決定コストの低下により、モデル植物では全ゲノム情報に基づいた変異箇所解析が可能となった。その結果、イオンビームでは、目的ごとにイオン種を選択するオンデマンド照射技術を提案する。即ち、炭素イオン照射は変異率が高く、一遺伝子破壊による機能欠失変異体が殆どであるため品種改良に、アルゴンイオン照射は数 kb～数十 kb の大欠失や染色体再構築が高頻度に発生するため⁴⁾、タンデム重複遺伝子の破壊、顕性や新奇形質の獲得に適する。また、微生物の変異誘発は鉄イオン照射を推奨している⁵⁾。

表. キク花色変異誘発における放射線照射条件の最適化

品種	照射部位	変異原	線量 (Gy)	生存率 (%)	調査数	変異率 (%)
千代 (茨城県)	培養体	γ線	80	46.1	149	18.8
		X線	7	43.1	118	9.3
		炭素イオン	10	93.7	57	14.0
佐賀SK1 (佐賀県)	穂木	放射光	11	88.3	117	39.3
		炭素イオン	9	95.0	175	50.3

引用文献

1) H. Nakagawa and H. Kato, Bull. NARO, Crop Sci. **1** (2017) 33、2) 鈴木一典、加速器利用研究グループ植物照射ユーザー会報告書 2003 (2004) 11、3) 坂本健一郎、九州シンクロトロン光研究センター 10 年史 (2018) 53、4) Y. Kazama et.al., Plant J. **92** (2017) 1020、5) H. Ichida et.al., Mut.Res.**639** (2008) 101

加速器施設の突然変異育種利用 —重イオンビーム育種技術の開発—

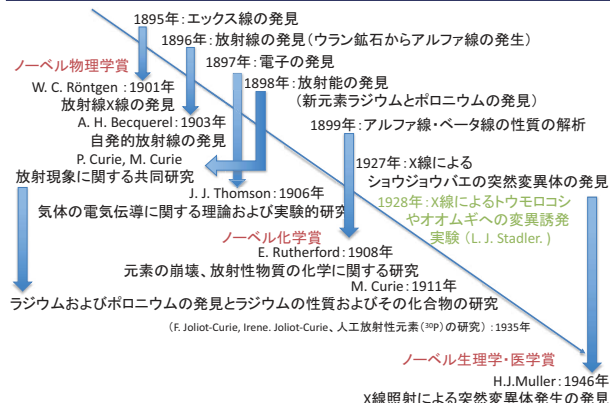
阿部 知子
理化学研究所仁科加速器科学研究センター
イオン育種研究開発室

埼玉県和光市

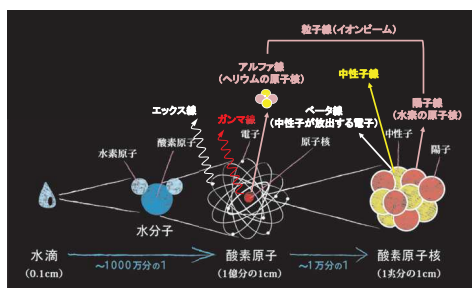


戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 戦略的イノベーション推進プログラム (SIP)「次世代農林水産業 創造技術」(管理法人: 農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター)によって実施されました。

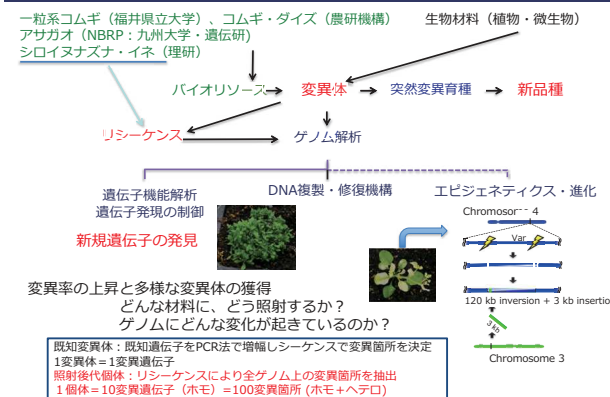
放射線の発見とノーベル賞、そして生物利用



エックス線からイオンビーム



Mutagenomics: 変異体を用いて新しい遺伝子を見つける



RIビームファクトリー (RIBF) 重イオンビーム加速器施設: サイクロトロン



E5 ビームライン生物照射装置





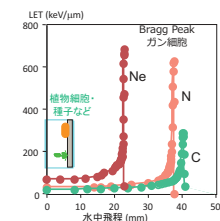
重イオンビームの生物利用

高い致死効果 = ガン治療技術 (Bragg Peak照射)

- 1) 重研機構放射線医学総合研究所
重粒子医科学センター病院 (千葉市)
- 2) 筑波大学附属病院陽子線医学利用研究センター
- 3) 国立がん研究センター東病院 (柏市)
- 4) 兵庫県立粒子線医療センター
- 5) 静岡県立静岡がんセンター
- 6) 福井県立病院陽子線がん治療センター
- 7) 南東北がん陽子線治療センター (郡山市)
- 8) 群馬大学医学部附属病院 重粒子線医学研究センター (前橋市)
- 9) メディボリス国際陽子線治療センター (指宿市)
- 10) 名古屋陽子線治療センター
- 11) 九州国際重粒子線がん治療センター (佐賀県)
- 12) 北海道大学病院陽子線治療センター (札幌市)
- 13) 相澤病院陽子線治療センター (松本市)
- 14) 神奈川県立がんセンター重粒子線治療施設 (横浜)
- 15) 岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センター
- 16) 札幌医科大学病院陽子線治療センター
- 17) 伯耆会大阪陽子線クリニック (大阪市)
- 18) 兵庫県立粒子線医療センター附属神戸陽子線センター (神戸市)
- 19) 大阪重粒子線センター

高い変異効果 = 育種技術 (均一照射)

理化学研究所仁科加速器研究センター (埼玉県)
重研機構高崎応用研究センター (群馬県)
石川県エネルギー研究センター (福井県)
重研機構放射線医学総合研究所 (千葉県)



イオンビームの特長

- 1) 重さと電荷がある
- 2) 局所的にエネルギーを落とす
- 3) LET (線エネルギー付与) が大きい
- 4) ブラッグピークがある



育種技術：生物の多様性を高め、目的のものを選抜する

	概要	課題
交雑育種	違った形質を持った品種を掛け合わせる	目的の形質をえるために時間と労力が非常にかかる
突然変異育種	人為的に突然変異を誘発する	目的とする形質のみを改変できないため、ある程度交雑育種を経る
細胞工学 (細胞融合・染色体倍加など)	違った形質を持つ細胞を融合する。染色体を倍加する。	育種目的や作物が限定される。
分子育種 (遺伝子組換え・ゲノム編集など)	人為的な遺伝子操作により目的の遺伝子を導入あるいは破壊する	遺伝子や作物が限定される。社会受容性が十分ではない

化学変異剤
放射線照射：γ線やX線照射が従来技術
加速器施設で発生するイオンビーム
(日本独自の技術)



キク (品種名：千代) の放射線による花色変異誘発効果



線質	線量 (Gy)	生存率 (%)	生存数	変異個体数	変異率 (%)
軟X線	7	43.1	118	11	9.3
鮮橙黄、鮮橙、明橙、濃紫赤、淡紫ピンク					
ガンマ線	80	46.1	149	28	18.8
鮮橙、明橙、淡橙、濃紫赤、濃紫ピンク、濃ピンク、鮮紫ピンク、淡紫ピンク					
炭素イオン	10	93.7	57	8	14.0
鮮黄橙、鮮橙、明橙、濃紫赤、赤					

共同研究：茨城県

生存率に影響を与えない線量で変異誘発可能



変異原の比較

イオンビーム

(高LET*)

小さいクラスター損傷
(DNA 二本鎖切断)

大きいクラスター損傷
(DNA二本鎖切断)

修復が困難

修復が困難

小欠失・中欠失

大欠失

染色体構造変異

X-ray, γ-ray

(低LET*)

ラジカルによる作用
(DNA一本鎖切断)

修復が容易

小欠失・大欠失

化学薬品

(EMS, MNU etc.)

塩基置換

修復が容易

点突然変異

変異率

+ ~ ++

+

+++

変異体選抜を行う処理区の生存率

80%

50%

50%

変異原処理時間

数秒～数分

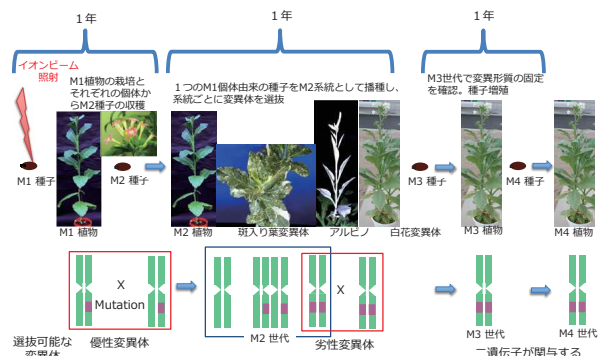
数時間～数ヶ月

数時間～数日

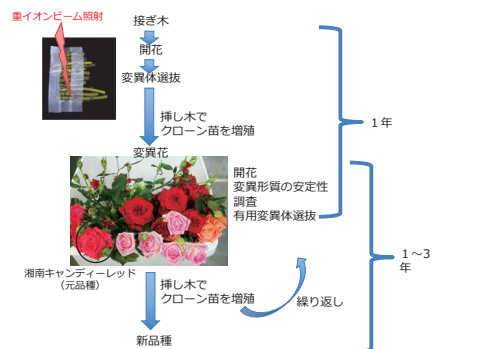
* LET (線エネルギー付与)：飛程によって単位長さあたりに与えるエネルギー (keV/μm)。一般に大きいと生物に与える影響が大きい



どこに照射するか？—種子繁殖—



どこに照射するか？—栄養繁殖— イオンビーム照射と植物組織培養体は相性が良い



共同研究：神奈川県

