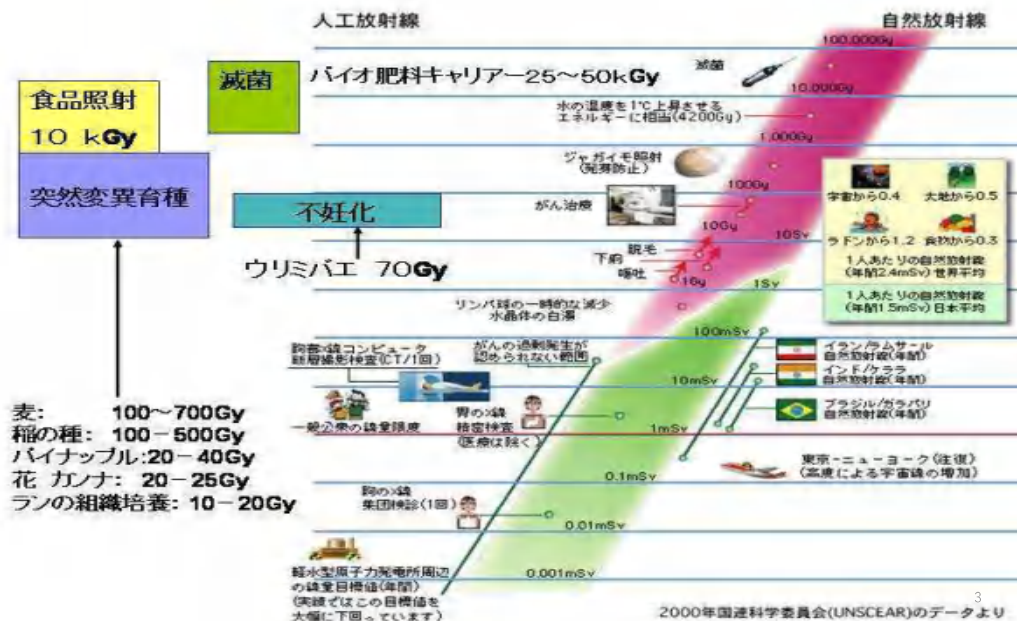


農業分野での放射線の利用： 主に放射線育種場で育成された主な品種 と遺伝学研究成果

中川 仁(浜松ホトニクス株式会社 中央研究所
元農業生物資源研究所:第14代放射線育種場長)

本日の講演内容

1. はじめに
2. 放射線の基礎知識
3. 農業における原子力平和利用の経済効果
4. 放射線育種の歴史
5. 放射線育種場のガンマ線照射施設
6. これまでに我が国で育成された突然変異品種と経済効果
7. 突然変異品種の成果
8. ゲノム研究の成果:突然変異メカニズムの解明と突然変異リソース
作出
9. 世界の照射施設と成果など



放射線・放射能の単位

	新	旧	変換
放射能	Bq (becquerel: ベクレル)	Ci (curie: キュリー)	1 Ci = 3.7 x 10¹⁰ Bq
吸収線量	Gy (Gray: グレイ)	rad (ラド)	1 rad = 0.01 Gy
		R (Roentgen: レントゲン)	a unit of measurement for ionizing radiation (such as X-ray and gamma rays)
線量	Sv (Sievert: シーベルト)	Rem (レム)	1 rem = 0.01 Sv

放射線利用に貢献した研究者

ベクレル



ウラン塩によって偶然感光させた写真乾板

- アンリ・ベクレル(Antoine Henri Becquerel): 1852年12月15日 - 1908年8月25日: フランスの物理学者。放射線の発見者であり、この功績により1903年ノーベル物理学賞を受賞。(Google検索による)
- 1896年、ウラン塩の蛍光を研究中に、ウランが放出した放射線(アルファ線)が写真乾板を露光させることを発見。ベクレルは偶然放射線を発見した。ベクレルはウラン塩と乾板を一緒にしまっておいた。ところが実験を再開する前に確認すると、乾板が既に感光していることに気づいた。ウランが発しているのが何らかの放射線であることは、空気の電離によって確認し、ウラン濃度に対する放射線の強度の分析や、ウラン以外の放射性元素のた。
- 1903年、ノーベル物理学賞をキュリー夫妻と共に受賞。
- 放射能のSI単位のベクレル(Bq)はアンリ・ベクレルに因んでいる。

キュリー夫人



- マリヤ・スクウォドフスカ・キュリー(Maria Skłodowska-Curie): 1867年11月7日 - 1934年7月4日): ポーランドのワルシャワ生まれ。(Google検索による)
- フランスのソルボンヌ大学を卒業。夫のピエール・キュリーとともに、大量のピッチブレンド(瀝青ウラン鉱)の残渣からラジウムとポロニウムを精製、発見し、1903年に夫婦でノーベル物理学賞を、1911年には単独でノーベル化学賞を受賞した。
- 彼女とその一家は歴史に名前をとどろかせている。彼女が物理学賞と化学賞、夫ピエールが物理学賞、娘夫婦(イレーヌ・ジョリオ・キュリーとフレデリック・ジョリオ・キュリー)がそれぞれ化学賞を得ている。一族4人で獲得したノーベル賞の数は5。彼女の功績を称え放射能の単位「キュリー」になった。女性として史上初のノーベル賞受賞者であり、物理学賞と化学賞を受けた唯一の人物である。2度のノーベル賞受賞は"人物"として最多記録である。
- 1934年5月、体調不良で療養所に入院し、同年7月4日、白血病で死去。享年66。

レントゲン

- ヴィルヘルム・コンラート・レントゲン(Wilhelm Conrad Röntgen): 1845年3月27日 - 1923年2月10日)は、ドイツの物理学者。1895年にX線の発見を報告し、この功績により、1901年、第1回ノーベル物理学賞を受賞した。(Google検索による)
- 1895年、この光のようなものが手を突きぬけ手の写真をとることができた。レントゲンは新種の電磁波の存在を確信し、数学の未知の数をあらわす「x」の文字を使い仮の名前としてX線と名付けた。それは放射線の発見であった。
- X線の正体は1912年まで謎のままであったが、透過性の高いX線の発見はただちに医学に応用されたため(X線写真)、この功績に対し1901年最初のノーベル賞が贈られる。



1901年第1回ノーベル物理学賞
ヴィルヘルム・レントゲン

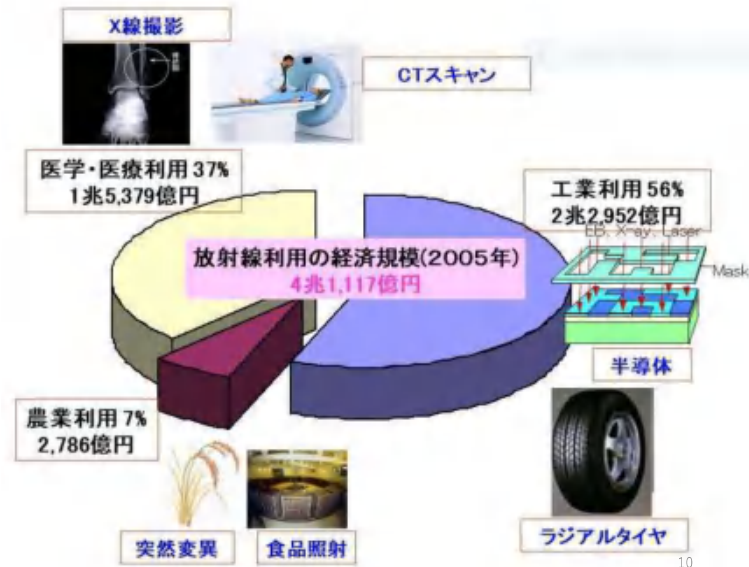


レントゲンが1896年1月23日に撮影した手の透視画像。骨と指輪の部分が黒く写っている。

- 科学の発展は万人に寄与すべきであると考え、レントゲンは、X線に関し特許等によって個人的に経済的利益を得ようとは一切せず、1923年ドイツの破滅的インフレの中、無一文でこの世を去る。

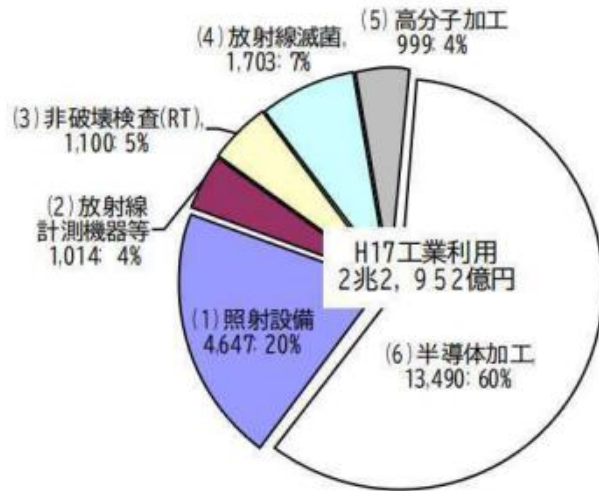
原子力平和利用の経済効果

2005年度の放射線利用の経済規模の推定(平成19年度放射線利用の経済規模に関する調査報告書)



久米民和(2021)「ダラットだより2」より転写

平成17年度(2005年)の放射線工業利用の経済評価(平成19年度放射線利用の経済規模に関する調査報告)



2005年度の放射線農業利用(食品照射)の経済規模の推定

項目	億円
照射利用	
食品照射	9
害虫駆除	67
滅菌	26
突然変異育種	
イネ	2,453
ダイズ	55.6
コムギ	5.7
オオムギ	1.0
その他(ニホンナシなど)	23.7
アイソトープ利用	
RIを用いる研究	4
放射能分析	140
¹⁴ C年代測定	1
合計	2,786

世界の食品照射処理量総量: 40.5 万t
経済規模: 1兆 6,100 億円

- ①香辛料類の殺菌 18.6 万t
- ②穀物・果実の殺虫 8.2 万t
- ③ニンニクなどの発芽防止 8.8 万t
- ④肉・魚介類の殺菌 3.2 万t
- ⑤その他 1.7 万t

食品照射処理量が千トン以上の国: 16 カ国(中国、米国、ウクライナは処理量が7万トン以上と突出)

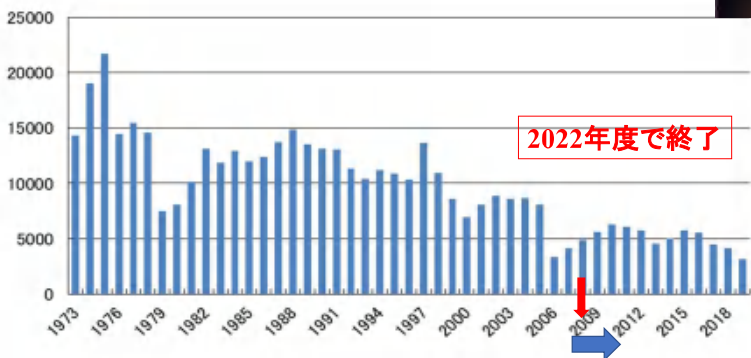
アジアを中心に食品照射は順調に伸びているが、EUは表示違反の取り締りを強化し、後退の懸念

(平成19年度放射線利用の経済規模に関する調査報告)

馬鈴薯（ばれいしょ：ジャガイモ）の実用照射

（元原子力研究所高崎：久米民和氏提供）

- 1972年：食品衛生法における馬鈴薯照射の禁止解除
- 1973年：日本原子力研究所（当時）の設計により施工：60-150Gy
土幌農協で実用照射開始：1.4万トン
- 1975年：最高2.2万トンの処理、その後減少傾向



害虫防除および不妊虫放飼（ウリミバエ）

ウリミバエは野菜や果物を食害し、本土に輸出できなかった

昭和58年(1983)

3月にウリミバエ大量増殖施設を建築。5月より当施設での増殖開始。

昭和59年(1984)

3月にウリミバエ不妊化施設が完成。8月より照射開始。

平成5年(1993)

「不妊虫放飼法」により、ウリミバエを沖縄全域から根絶。



図4：成虫による果実への産卵



図5：幼虫による果実（左：がぼちゃ 右：にがうり）への加害

ウリミバエ（農水省ホームページ）

14

ウリミバエの不妊虫作出と放飼

（元原子力研究所高崎：久米民和氏提供）

不妊虫放飼法(SIT)とは、

- ①大量培養したウリミバエの蛹に、⁶⁰CO線源によるガンマ線を照射して不妊化する。
- ②羽化した成虫をヘリコプターで現地に放つ。
- ③交尾した卵は孵化しない。



蛹の入った容器が線源の周りを移動する



沖縄県ウリミバエ不妊化施設の概要作成：1999/10/18 小山 重郎
放射線利用技術データベース
<http://rada.or.jp/dbtop/riyoudb/index.html>

ウリミバエ撲滅による沖縄県の経済効果 (Kumeら(2002) Journal of Nuclear Science and Technology 39(10): 1106-1113; 原著はドル単位で記載)

項目	効果(億円)
沖縄からの本土への輸出	
輸出作物の増加	32
それまでの検査と燻蒸(殺虫)処理	0.1
沖縄県内の消費 (ウリ類全生産額)	(95)
生産量増収	29
合計	61

16

放射線育種の歴史

17

この日本初の理研のサイクロトロン

このサイクロトロンは世界最初に開発されたカリフォルニア大学バークレーの**Prof. E. O. Lawrence**に次ぐ、博士のサポートで建設された**世界2番目**のものであった。**(Kim 2006)**.

しかし、このサイクロトロンは、第二次世界大戦後、連合国軍最高司令官総司令部(**GHQ**)によって、**1945年**に当時大阪大学にも存在した他の**4つ**のサイクロトロンと共に東京湾に沈められた。

仁科芳雄博士らが、戦後の日本人の生物学や医学研究のために必要であるから残してほしいと嘆願したが聞き入れられなかった**(Nishina 1947)**.

19

作物突然変異育種の黎明期の研究

(鶴飼保雄、2005、植物改良への挑戦、培風館)

1928 田中義麿:「将来の遺伝学」(鳥取農学会報)の中で突然変異の誘発源として**X線**が有望であるとした。

1934 市島吉太郎(台北帝国大学)がイネ種子の**X線**照射によって、**M₂**で最初に突然変異体を得た。

1937 東京都文京区にあった理化学研究所で「小サイクロトロン」が建設され、**仁科芳雄**らは、中性子とガンマ線の混合放射線をマウス、ソバ、アサ、ソラマメ、林木に照射し、細胞学的効果などについて研究した。

18

我が国の突然変異育種の歴史: **ガンマ線照射施設** (太平洋戦争直後は、放射線同位元素の利用がGHQによって禁止された) → 解禁後

1956:最初のガンマールーム

1) 国立遺伝学研究所、三島; **2)** 蚕糸試験場、東京

1957: 農業技術研究所、平塚(ガンマールーム): **1958年**から照射依頼を受ける

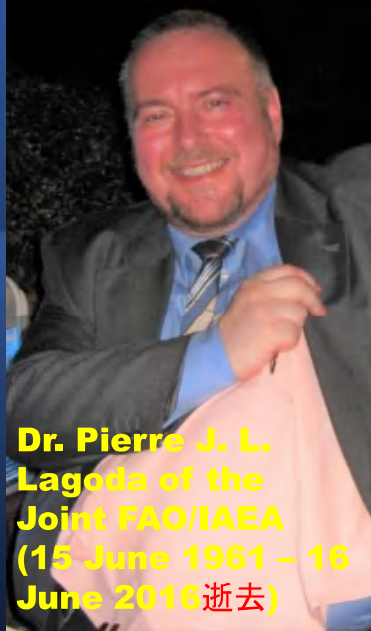
1958: 林業試験場; 富山県農業試験場(ガンマールーム)

1960: **放射線育種場**(ガンマフィールド建設)

その後ガンマーグリーンハウス、ガンマールーム、およびガンマファイトロン

20

私にとっての 放射線育種 の師



Dr. Pierre J. L.
Lagoda of the
Joint FAO/IAEA
(15 June 1961 – 16
June 2016 逝去)



東京大学
鶴飼保雄名誉教授
(2019年11月20日 逝去)

放射線照射を用いて育種した有用な突然変異

Dr. Lagoda (The New York Times, Aug 28, 2007)

彼は言いました。手でサイコロをもてあそびながら、

「私は同じことをしているだけです。」

「私は自然が行うこと以外の何も行っていません。私は遺伝子素材そのもの以外の何物も使っていません。」「自然突然変異は進化の原動力です。我々は自然のまねをしています。我々は育種研究者が活着している間に彼の研究を遂行できるように、時間と空間を濃縮しているのです。...これは万能薬(panacea)ではありません。これは解決法でもありません。それでも、育種にかかる時間を短縮するための非常に有効な手段です。(中川訳)」

- 照射によって放射化しないガンマ線がパブリックアクセプタンスを得ることができた、最も重要な視点
- イオンビームや中性子照射は？ 遺伝子組み換え作物は？ ゲノム減収技術のパブリックアクセプタンスは？

22

突然変異(mutation)とは、偶発的または人為的に生じるDNA塩基配列の変化

1) 人為突然変異(Induced mutation): 突然変異原(放射線、化学物質、トランスポゾン、ゲノム編集)で処理された生物体においてDNAに生じた傷が原因で生じる塩基配列の変化

2) 自然突然変異(Spontaneous mutation): 変異率は極めて低い。

10^{-9} /年(進化系統樹の解析)

線虫: 20.9×10^{-9} ; ショウジョウバエ: 8.5×10^{-9} ; マウス: 11.2×10^{-9} ; ヒト: 20×10^{-9} (染色体の大きさなどの影響)

23

自然突然変異率は低いのか？

生物が持つゲノム全体の塩基で考えると、影響は小さい。

10^{-9} /年/塩基対とすると、全ゲノムで 10^9 塩基対(cf. イネは4億3千万塩基対でこの約半分)を持つ生物では毎年平均1個の突然変異が生じる。

24

数字

- 人間の体の中にある細胞の数:
60,000,000,000,000 (60兆個: 60×10^{12})
- 細胞の大きさ:
1 μ m
- 1細胞のDNAの長さ:
1.8 m
- 人間の体にある全DNAの長さ:
100,000,000,000km (地球と太陽の間の距離の600倍)

25

ソルガムのガンマ線急照射による放射線感受性 (Radiosensitivity) : 適正照射線量の推定

鵜飼保雄、2007、「植物が語る放射線の表と裏」、培風館

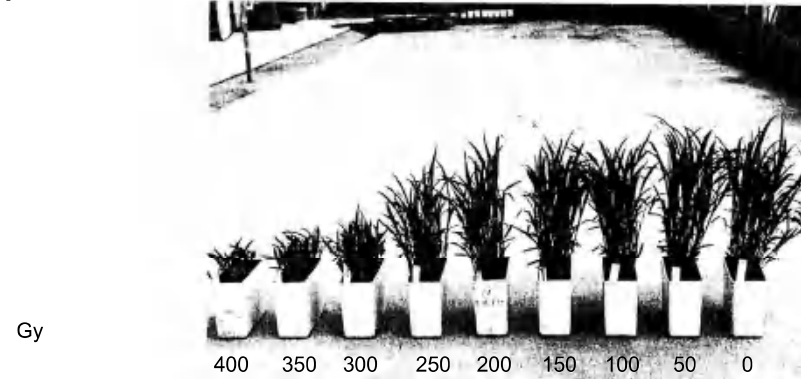
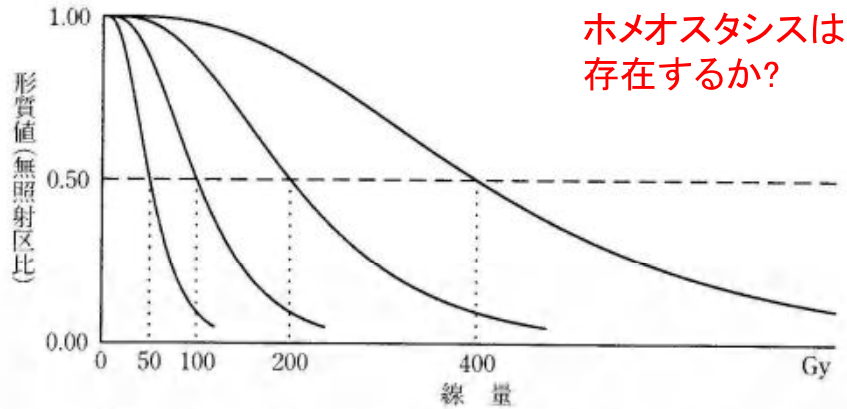


図10.8 ソルガムの種子照射における照射線量にともなう幼苗の草丈の減少。最右が無照射の対照区で、以下左に50、100、150、200、250、300、350、400 Gyを照射した区。300 Gy以上では草丈がいちじるしく減少している。この品種では突然変異育種上の適正線量は200ないし250 Gyと判断される。

26

線量反応曲線



ホメオスタシスは存在するか?

図10.4 線量反応曲線と放射線感受性の品種間差異。形質値が無照射区に対する比が0.5になる線量を D_{50} という。放射線感受性は形質値でなく D_{50} にもとづいて比較する。

鵜飼保雄、2007、「植物が語る放射線の表と裏」、培風館

27

ガンマフィールドでの γ 線生体照射 (緩照射) : 適正照射線量の推定

鵜飼、植物育種学、2003

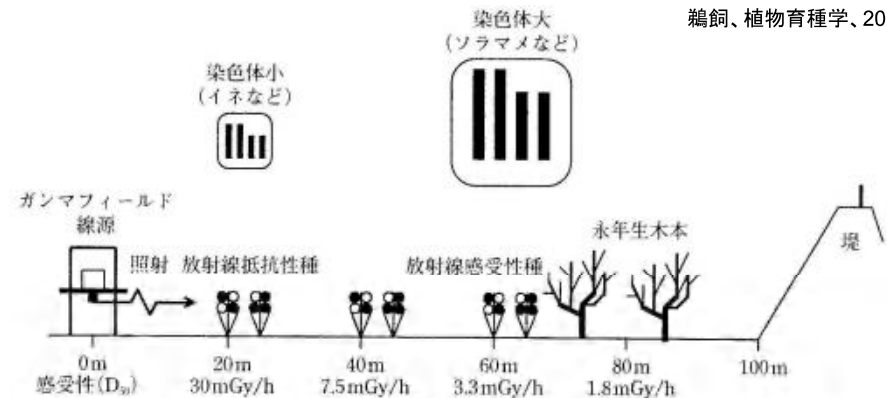
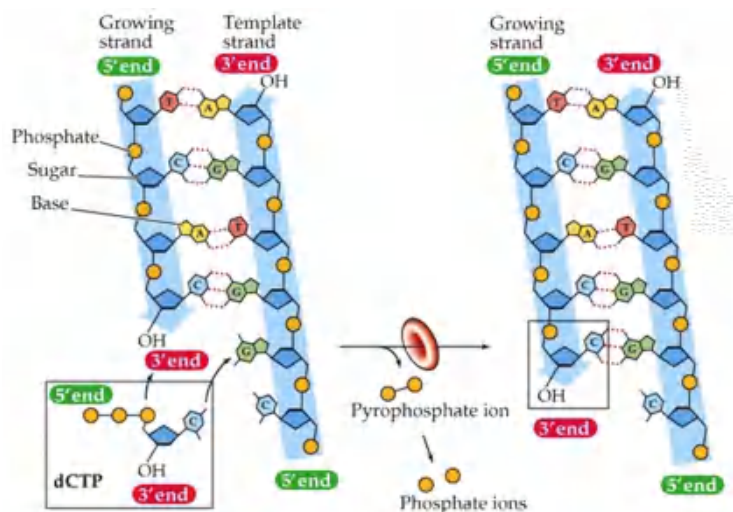


図10.6 ガンマフィールドにおける γ 線の生体照射。1年生で γ 線に対して抵抗性の植物は線源に近く、感受性の植物は線源から遠い地点に栽植される。また永年生木本の果樹、林木、チャ、クワなどは線源から遠い地点に定植され、低い線量率で長い年数の間、連続して照射される。線量率は概算値。

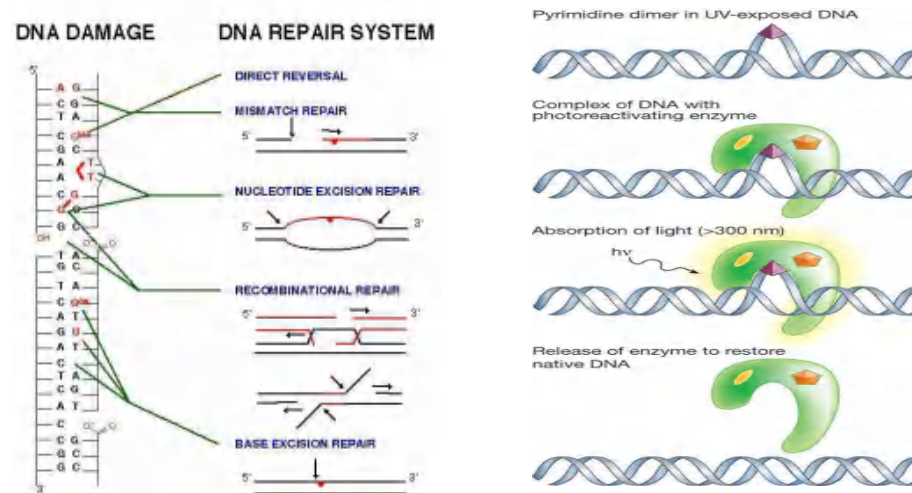
28

突然変異はどのように起こるか？DNA の複製エラー



29

DNA 損傷および損傷後の修復システム： 修復不可あるいは修復時の誤り



30

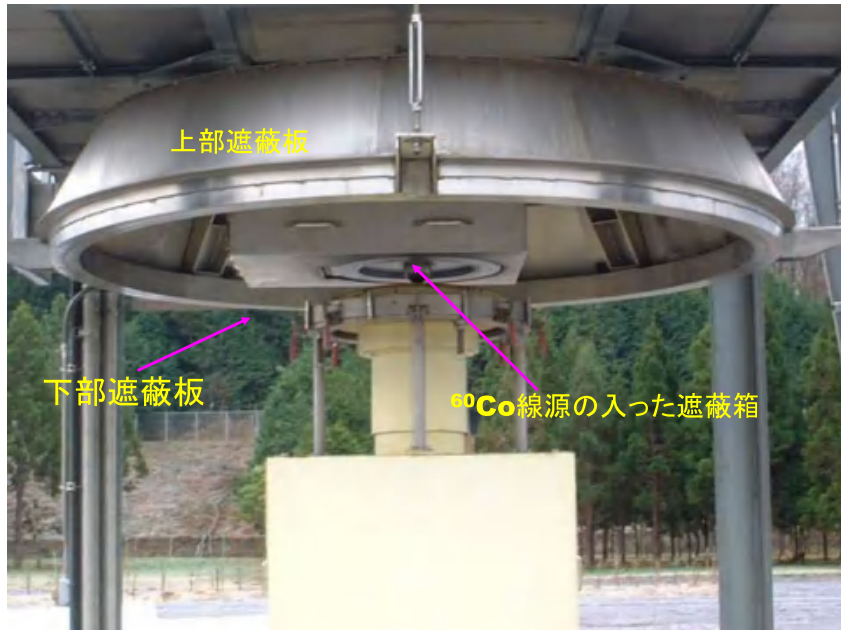
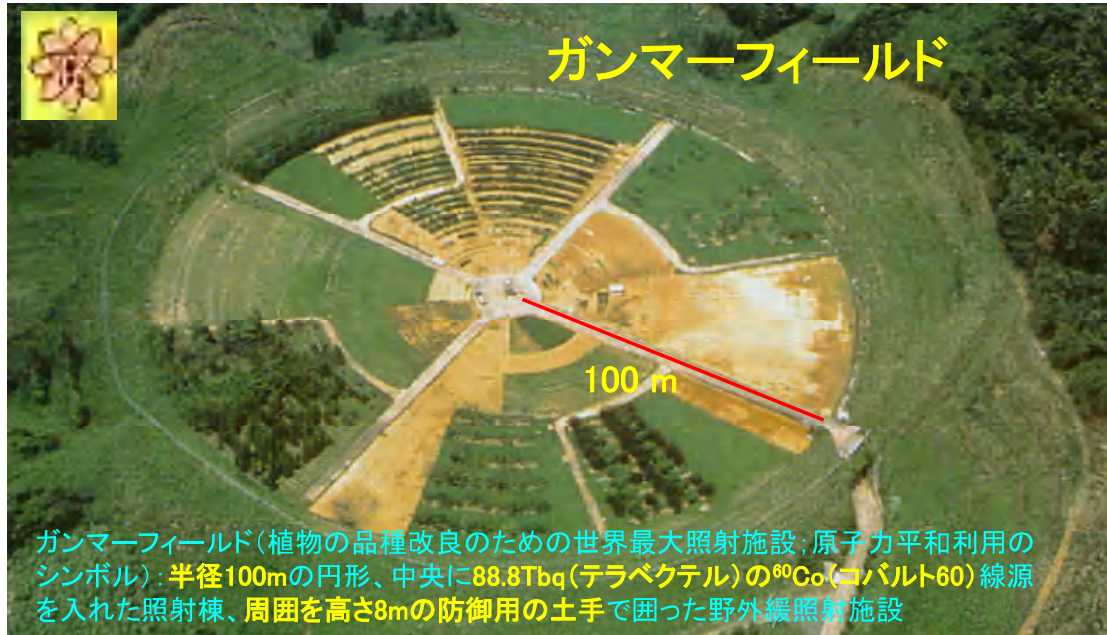
放射線育種場のガンマ線照射施設



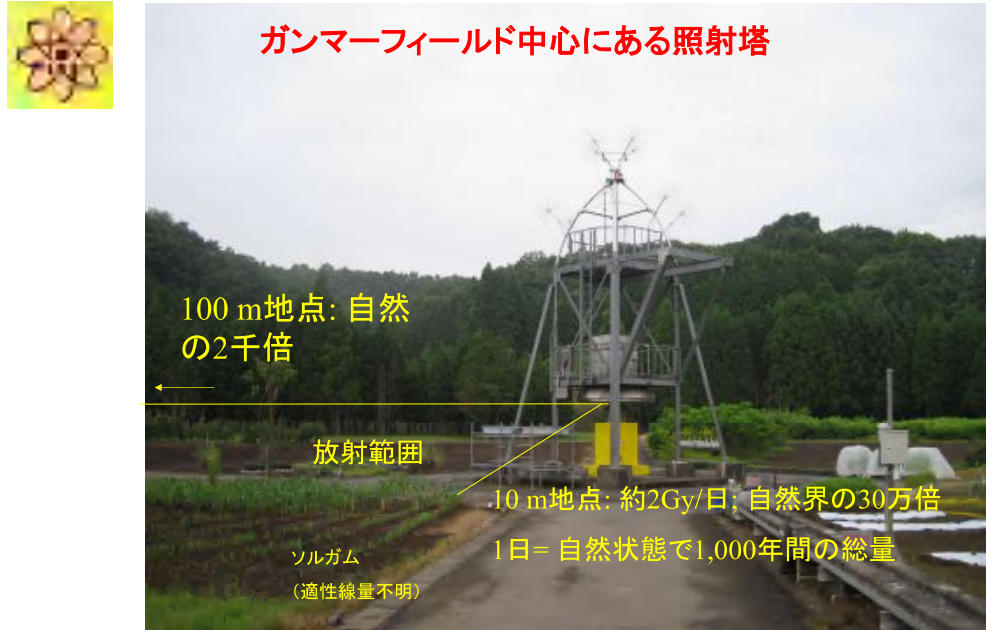
- 1958** 農業技術研究所に照射施設建設。イネ突然品種「レイメイ」(1959年照射; 1966育成)
- 1960** 農林省の独立研究機関として放射線育種場を茨城県大宮町(現常陸大宮市:いくつかの候補地から選定)に設置しガンマフィールド始動。東京大学と共同で放射線育種研究や事業を開始。
- 1970**, 農林省農業技術研究所に統合以後、何度かの農水省研究機関の組織再編。
- 2001**, 独立行政法人農業生物資源研究所の研究グループ以後、組織再編。
- 2023** 照射業務を終了

31

32



ガンマ線照射線源: 88.8 TBq (テラベクテル)の⁶⁰Co (コバルト60)線源



ガンマルーム:
44.4 TBq ⁶⁰Co 線源を用いた室内急照射用の遮蔽施設で種子、球根やイモ類、培養した組織などに照射できる。



ガンマグリーンハウス: 半径7mの正八角形の温室で、霜に弱い熱帯作物のための緩照射施設。(照射線源は¹³⁷Cs: 1964)



これまでに我が国で育成された突然変異品種と経済効果

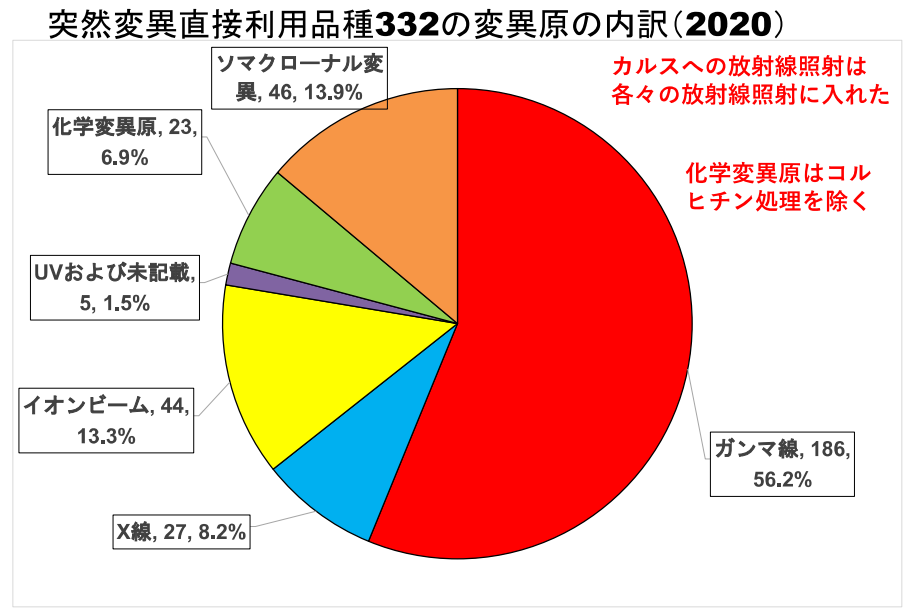

the Joint FAO/IAEA Mutant Variety Database


3,402 varieties (March 8, 2023) (<https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Home.aspx>)

世界の突然変異品種数

登録数
3,402
2023年
3月8日時点

国名 (Country)	数 (Number)
1. 中国 (China)	817
2. 日本 (Japan)	500
3. インド (India)	345
4. ロシア (Russian Federation)	216
5. デンマーク (Netherlands)	176
6. ドイツ (Germany)	171
7. 米国 (USA)	139
8. バングラデシュ (Bangladesh)	78
9. ブルガリア (Bulgaria)	76
10. パキスタン (Pakistan)	59
11. ベトナム (Vietnam)	58
12. インドネシア (Indonesia)	52
13. 韓国 (Republic of Korea)	40
13. カナダ (Canada)	40
15. フランス (France)	39



突然変異直接利用品種335の内訳(2023)

	全突然変異品種 ¹	放射線	ガンマ線	放育場照射
79 作物種	335	259	186	136
Rice イネ	49	23	22	21
Wheat コムギ	4	2	2	0
Barley オオムギ	5	4	3	0
Soybean ダイズ	19	18	17	9
Barnyard millet食用ヒエ	5	5	4	4
Job's Tear ハトムギ	2	2	2	2
Buckwheat ソバ	3	3	3	3
Tartary Buckwheat ダツタンソバ	3	2	1	1
Burdock ゴボウ	5	5	5	4
Apple リンゴ	3	2	2	2
Japanese Pear ナシ	3	3	3	3
Chrysanthemum キク	67	64	39	39
Roseバラ	10	7	7	6
Cytisus エニシダ	8	8	8	8
Zoysia シバ	6	5	3	3
Others その他	144	107	64	31

突然変異間接利用488品種の内訳(2023)

イネ	コムギ	オオムギ	ダイズ	イグサ	レタス	トマト	ハトムギ	ナス	シバ	合計
438	8	9	16	2	4	3	1	1	6	488

42

半矮性突然変異品種「レイメイ」

「フジミノリ」は耐寒性に優れた良い品種であったが、草高が高く、多肥にすると倒伏しやすい欠点があった。種子にガンマ線照射(200 Gy)(農技研)を行って、15 cm 短稈にしたのが「レイメイ(黎明)」である(蓬原雄三・河合 武・鳥山國士)。

この半矮性遺伝子は、劣性の *sd1*、であり、イネの「緑の革命」に貢献した *as cv. IR8, Calrose 76, Dee-geo-woo-gen*, の半矮性遺伝子と同じであった。



天野福井大学教授提供

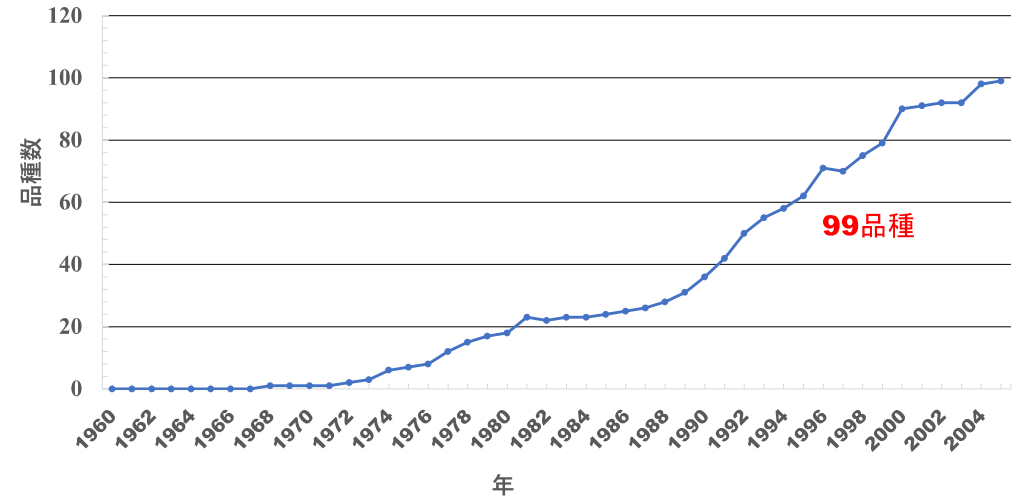
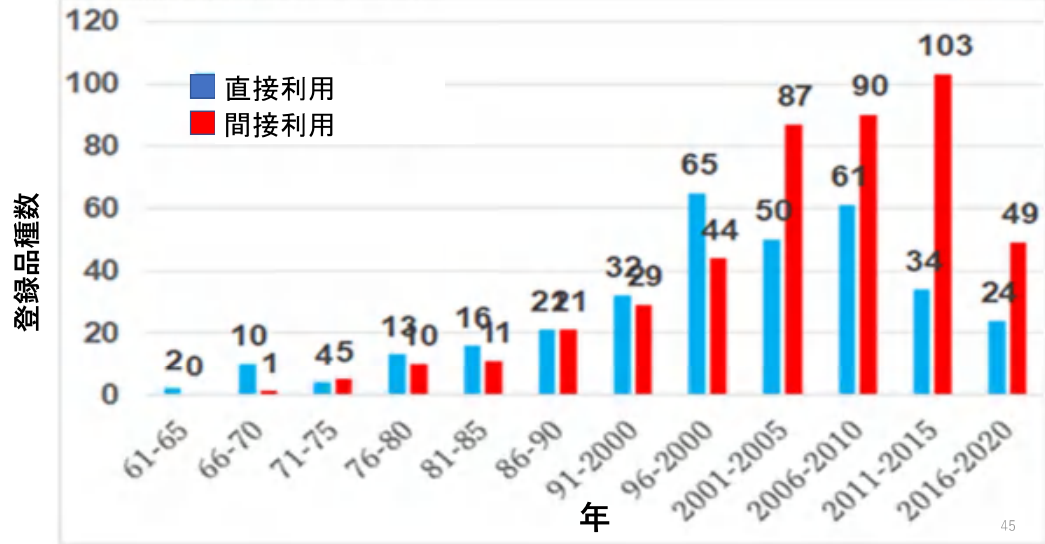
43

「レイメイ」由来突然変異間接利用品種数とその割合

Origin 由来	品種数(%)
レイメイ	199 (45.4%)
北陸100号(キヌヒカリ)	87 (19.9%)
ミネアサヒ	85 (19.4%)
その他	106 (24.3%)
合計	438

44

我が国で1961年から2020年までの各5年に品種登録された突然変異直接利用品種(332)および突然変異間接利用品種(450)の推移



1960年から2005年までに農家で栽培された突然変異品種の栽培品種数の推移



1960年から2005年までに農家で栽培された突然変異品種の栽培面積の推移(1960-2005:栽培面積1ha以上の突然変異品種の合計)



1960年から2005年までに農家で栽培された突然変異品種栽培による農家粗収入の推移(1960-2005)

2020年にトップ20品種に入った突然変異品種((公財)米穀安定供給確保支援機構 2022)

品種名(ランク)	栽培面積 (ha)	突然変異由来
1. はえぬき(6位)	41,132 (2.8%)	レイメイ(短稈:フジミノリ)
2. まっしぐら(7位)	32,318 (2.2%)	レイメイ
3. キヌヒカリ(8位)	30,849 (2.1%)	北陸100号(短稈:コシヒカリ)
4. あさひの夢(9位)	24,973 (1.7%)	ミネアサヒ(関東79号:短稈:コシヒカリ)
5. きぬむすめ(11位)	22,035 (1.5%)	北陸100号
6. こしいぶき(12位)	20,566 (1.4%)	レイメイ
7. つや姫(13位)	17,628 (1.2%)	北陸100号
8. 夢つくし(14位)	14,690 (1.0%)	北陸100号
9. ふさこがね(15位)	13,230 (0.9%)	ミネアサヒ
10. つがるロマン(16位)	11,752 (0.8%)	レイメイ
11. あいちのかおり(17位)	11,752 (0.8%)	ミネアサヒ
12. さいのかがやき(18位)	10,283 (0.7%)	レイメイ、ミネアサヒ
13. 天のつぶ(19位)	10,283 (0.7%)	レイメイ、北陸100号
突然変異品種全面積	261,482	
全水稻面積	1,460,000	
割合(%)	17.8	

1997, 2001, 2005, 2011, 2014, 2015, および2017年に栽培された大豆突然変異品種栽培面積

品種名	1997	2001	2005	2011	2014	2015	2017
ライデン ¹	80	8					
ワセズナリ ¹	120						
むらゆたか ¹	3,507	5,910	2,466	1,403	1,173	1,021	1,039
コスズ ¹	498	863	576	194	134	111	39
いちひめ ¹		35	130				
あきたみどり ¹		8	87		40	40	
ナンブシロメ ²	1246	1,550	1,534	2,132	1,472	1,423	610
トモユタカ ²	2						
鈴の音 ²	10	50					
エルスター ²			447				
すずさやか ²			10	65	61	73	
すずかおり ²				56	70	45	
リュウホウ ²	1150	7,050	8,033	10,548	9,600	10,295	9,616
きぬさやか ²					61	100	96
京白丹波 ²					4	4	
突然変異品種全:	6,613	15,474	13,283	14,398	12,614	13,112	11,400
全大豆栽培面積	83,200	143,900	134,000	136,700	131,900	141,972	121,300
%	7.95	10.75	9.91	10.53	9.56	9.24	9.40
農家販売額(億円)	ca. 20	ca. 59	ca. 52	22.6 (補助金込み115.7)			-

1: 突然変異直接利用品種; 2: 間接利用品種

20~59 億円