

日本における放射線の産業利用 —その歴史と将来展望—

Applications of Radiation Processing in Japan
—The History and Future Prospects—

早稲田大学

理工学術院・共同原子力専攻・教授

鷺尾 方一

はじめに

この講演では、過去から多くの関係者が積み上げてきた放射線の利用を社会実装する取り組みや、その結果について、できるだけ客観的に俯瞰し、終わりに将来への期待・展望をお示してみたいと思います。

講演内容

- 放射線利用の歴史概観・経済規模
- 各種放射線によるプロセス概観
 - ✓ 電子線(EB)応用
 - ✓ X線(ガンマ線)応用
 - ✓ イオンビーム応用
- 今後のプロセス展望

放射線利用の歴史概観

1895	レントゲン	X線の発見
1897	トムソン(J.J. Thomson)	電子の発見
1898	ラザフォード	α 線の発見
1898	キュリー	Ra、Poの発見
1911	ラザフォード	原子の構造推定
1931	ローレンス、スローン	線型加速器発明
1932	ローレンス	サイクロトロン発明
1932	コッククロフト、ウォルトン	静電型加速器発明
1932	チャドウィック	中性子の発見
1932	アンダーソン	陽電子の発見
1933	バン・デ・グラーフ	バンデグラーフ静電加速器発明
1935	湯川秀樹	中間子理論
1948	ドール	放射線架橋の論文発表
1952	チャールズビー	ポリエチレンの放射線架橋発見
1956	ethicon社	腸線縫合糸の電子線滅菌開始 その後、ガンマ線滅菌
1957	TE Connectivity	ポリエチレン熱収縮チューブ開発
1960	GE社	架橋ポリエチレンテープ実用化
1961	住友電工	電子照射ポリエチレン電線 製造開始 電子照射熱収縮チューブ 製造開始

放射線利用の歴史概観(2)

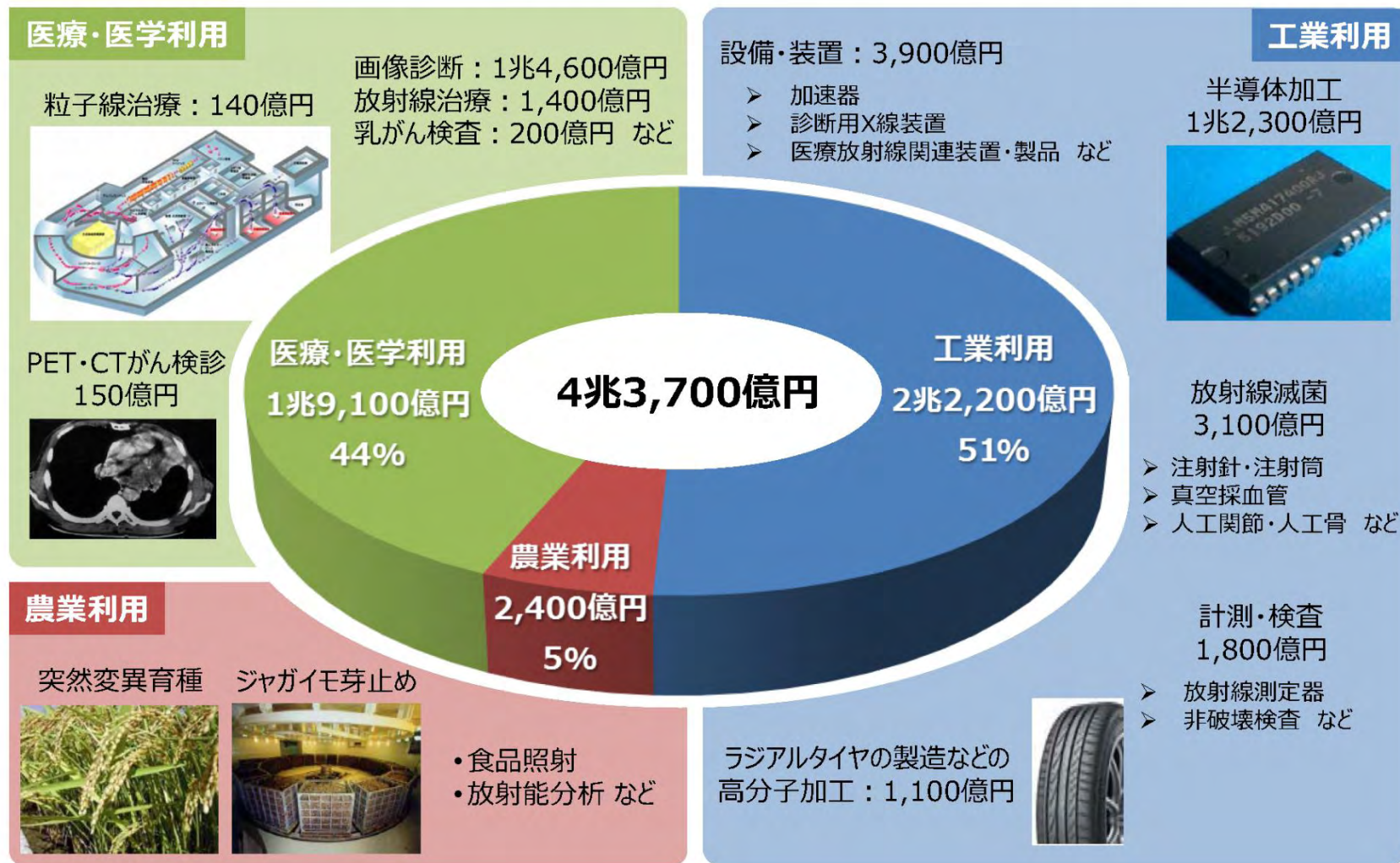
- 1963 **日本原子力研究所 高崎研(現QST)設立** 日本の放射線応用拠点開設
- 1969 国内最初のガンマ線受託施設開設(@栃木)
- 1970 ディスポ注射器、注射針のガンマ線滅菌承認
- 1970~ 電子照射技術を適用した、タイヤ、発泡プラスチックの生産開始
各種(架橋フィルム、リリースコート等)の電子硬化プロセス実用化
- 1971 第8改正日本薬局方に放射線滅菌が滅菌法の1つとして明記
- 1972 じゃがいもの芽止めに対するガンマ線照射許可
- 1973 日本メジフィジックス(株)設立 日本における放射性医薬品供給開始
- 1977 **第1回放射線プロセス国際会議開催**(@プエルトリコ)
- 1980~ FAO/IAEA/WHO 食品照射の健全性宣言(<10kGy以下)
- 1985 日本初の**サイクロトン利用技術サービス**開始(@愛媛)
- 1986~ フランスで電子線を用いた食品照射実用化
TDKがEBフロッピーディスクの生産開始(現在は廃止)
- 1989 国内初の**電子線受託施設**開設(@つくば)

放射線利用の歴史概観(3)

- 1990～ 各種電子線プロセスの実用化
自動車用電線、トンネル内装鋼板、半導体への欠陥導入、PTFE分解、
電池隔膜、高機能グラフト膜、生分解プラスチック
- 1991 電子線架橋技術によるSiC繊維ハイニカロン開発上市
- 1991 日本で医療用具の電子線滅菌実用化(初の厚生省認可)
- 1992 血液製剤のリンパ球活性調整でガンマ線照射が実用化
- 1997 WHO食品照射の上限値(10kGy)を撤廃(<75kGy)
- 2000～ VOC、ダイオキシン除去テスト開始
- 2002 PET保険適用(糖代謝診断薬)
- 2006 日本で医薬品(点眼薬)の電子滅菌認可
- 2007 超低エネルギーEB装置実用装置(50kV)市場投入
- 2010 PETボトルのインライン電子線滅菌開始(S社熊本)
- 2012 CERNでHiggs粒子発見(2013年にノーベル賞)
- 2015 ニュートリノ振動の発見で梶田隆章氏ノーベル物理学賞受賞

日本における原子力放射線利用の経済規模

平成27年度の放射線利用の経済規模



内閣府HPより引用

電子線(EB)の応用

電子線の応用分野一覧(抜粋)

- ・電線被覆の耐熱化、不燃化(グラフト技術)
- ・熱収縮チューブ、シート製造(架橋技術) → メモリーエフェクト
- ・発泡プラスチック製造(架橋技術) → 緻密な発泡
- ・ゴムの架橋(グリーンゴム強度増強) → タイヤ製造などに!
- ・塗膜硬化(UVと競合-重合技術)
- ・電池用隔膜(グラフト技術) → 電解質膜の大量製造
- ・殺菌、滅菌(DNA 2重鎖切断) → 医療用具滅菌
PETボトルインライン滅菌
- ・食品照射(日本以外 DNA 2重鎖切断) → 香辛料の滅菌
- ・排煙の脱硫・脱硝(イオン分子反応利用) → 公害対策
- ・水の清浄化(DNA 2重鎖切断、イオン化反応)
- ・プラスチックの架橋、改質(架橋) → 耐熱性・機械特性を向上
- ・半導体特製制御(格子欠陥生成) → あとから加工
- ・テフロン of 架橋 → 耐放射線性の向上、摺動特性の向上

電子線を使った反応のメリット

- ・エネルギー消費が非常に少ない(高効率)
- ・プロセス時間が非常に短い(秒単位)
- ・公害対策がほとんどいらない
- ・重合反応、架橋反応など反応の自由度が高い
- ・エネルギー吸収の際に素材の色を全く問題にしない
- ・イオン化を経由する反応を利用できる
- ・反応環境を種々選択できる(高温反応、低温反応など)

放射線照射の効率は、どれほど良いのか？

照射の際の反応量を考えるときには、どのくらいのエネルギーが、物質に吸収されたのか？ を考える必要がある。その単位が吸収線量。

吸収線量単位質量あたりに吸収されるEBのエネルギー量
で定義されます。この単位には Gy(グレイ) という単位が使われる。
(このGyという単位はJ/kgと等価。)

物質に10kGy (=10kJ/kg)の吸収線量が与えられた場合、その熱量(温度上昇)はどのくらい？(ほとんどのプロセスで10-30kGy程度の吸収線量が用いられる。)

水(定圧比熱4.2J/K·g)に、10kGyの吸収エネルギーが与えられた場合ですべてが熱に変わったとしても僅か2.4°Cの温度上昇。

なぜ放射線が高効率なのか？

物質の構成分子間の結合は、比較的弱い力

(電子同士の相互作用)に支配されている。

→その状態は、数eVのエネルギー(C-Hで4.3eV)
投入で変化する。

薬品や熱 によって与えられる物質の変化でもこの
電子状態の変化 を利用。

分子に変化を与えるもっとも直接的な方法は電子を直接
打ち込む！

このため、放射線によって与えられる効果は熱などに比べ
桁外れに効率が良くなる。

電子線応用技術(高分子架橋)



Heat Shrinkable Tubing

電子線応用技術(高分子架橋)



超耐熱炭化ケイ素繊維

鷲尾・前川監修
EB技術を利用した材料創製と応用展開
シーエムシー出版 2016, pp.171-179も参照下さい

(航空機エンジン(GE社製)への採用・型式認定; ハイニカロンタイプS)

Advanced Materials Development / Ceramic Composites

Fabrication of SiC fiber

Si-containing polymer fiber

↓ EB irradiation up to 10MGy

Cured polymer fiber

↓ Pyrolysis in inert gas ($\sim 1500^{\circ}\text{C}$)

SiC Fiber

- Diameter : $14\mu\text{m}$
- Tensile strength: 3GPa (300kg/mm^2)
- Heat resistant : 1700°C
- Density : 2.7g/cm^3



SiC fiber (Hi-Nicalon®)

Application of SiC fiber



Ceramic Matrix
Composites



Space plane materials

EB 応用技術(重合) 化粧材(建材)

▶ ノンワックスフロアシート「EB-F」

DNP様商品

EBコーティング技術：電子線を照射することにより、樹脂を硬化させる技術。ウレタンやUV樹脂コーティング製品に比べ、傷や汚れ、日光などに強く、高耐久かつ実用性能、品質安定に優れている。また、製造工程での省エネルギー化やCO₂排出量削減、無溶剤塗工が可能な次世代型環境対応技術

鷲尾・前川監修

EB技術を利用した材料創製と応用展開

シーエムシー出版 2016, pp.182-188も参照下さい



強靱な塗膜で、擦り傷、汚れ、日光に強いEBコーティング層

導管・木肌の凹凸を創出する透明エンボス・オレフィンフィルム

樹種デザインを表現する木目柄印刷層

着色ベース・オレフィンフィルム

DNP様HPより

<http://www.dnp.co.jp/kenzai/product/brand/brand05/>

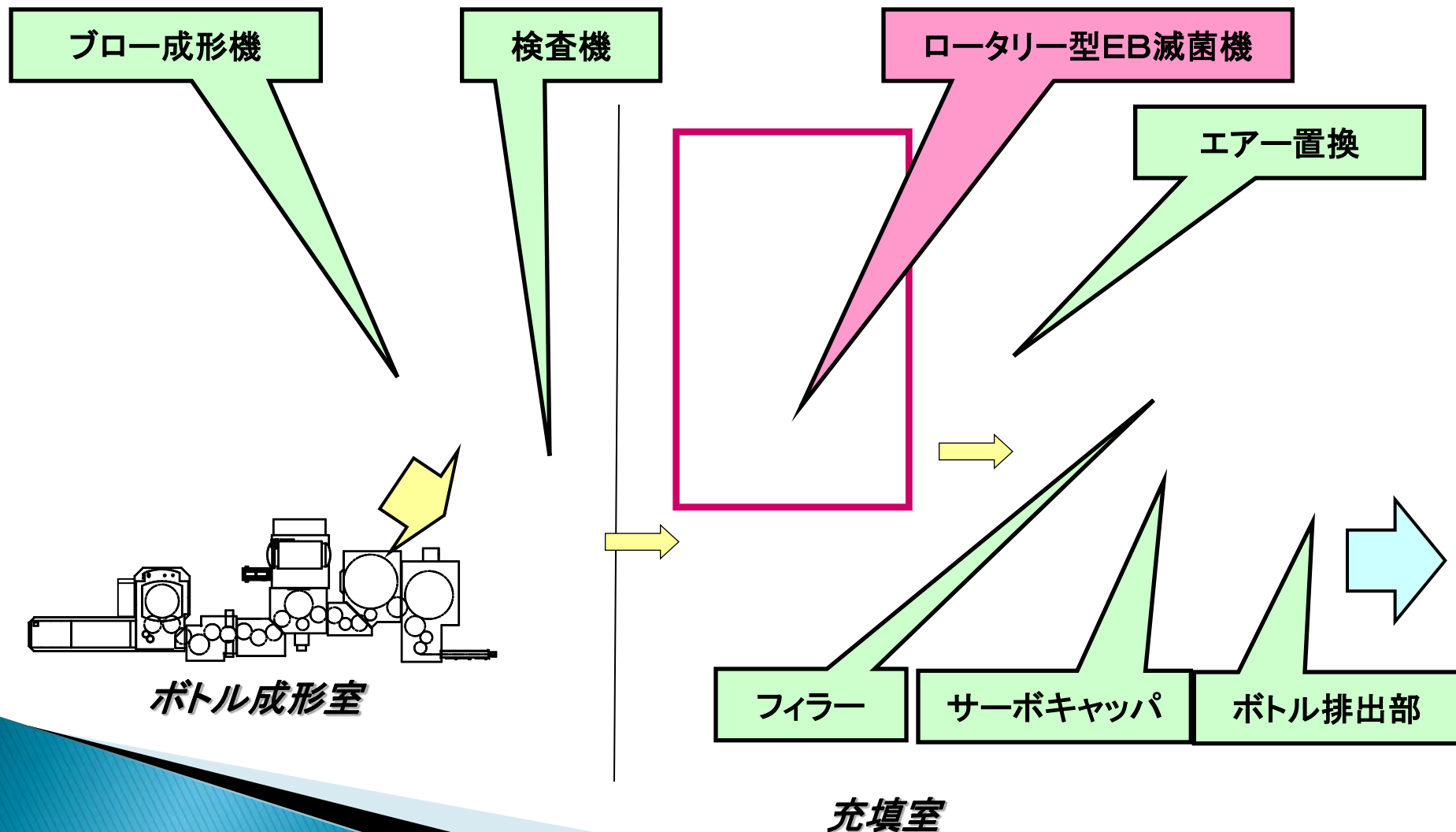
PETボトル用 EB滅菌システムの実用化



電子線加速器

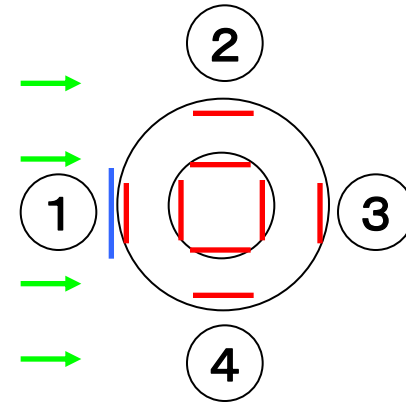
世界初のPETボトル飲料用
EB滅菌方式 無菌充填システムが実用化されている。
(澁谷工業(株))

EB滅菌アセプ充填システムのレイアウト例



▶ 口部吸収線量とコールドスポット

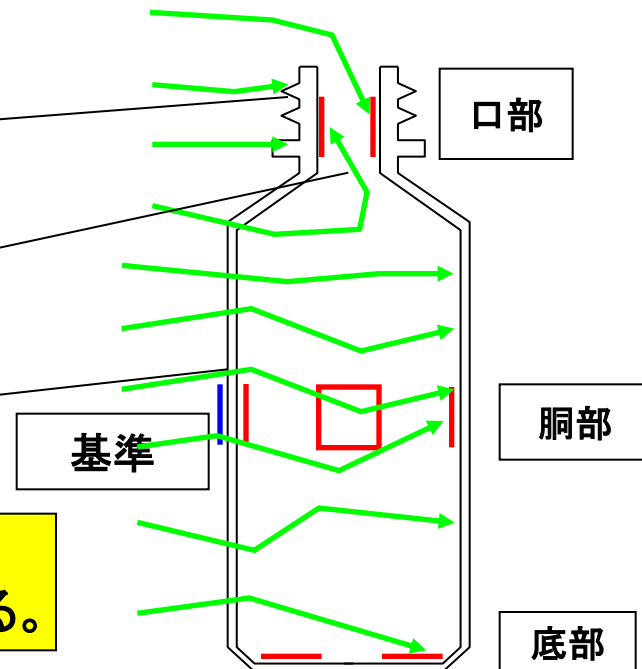
	①	②	③	④
口部内面	8. 8kGy	8. 8kGy	8. 7kGy	9. 1kGy
胴部内面	44kGy	30kGy	45kGy	30kGy
底部内面	32kGy	26kGy	32kGy	33kGy
基準位置	80kGy（胴部正面外側）			



口部は1mm程度の厚さがあるため
電子線が透過しない

口部は散乱によって回り込んだ
電子が当たる

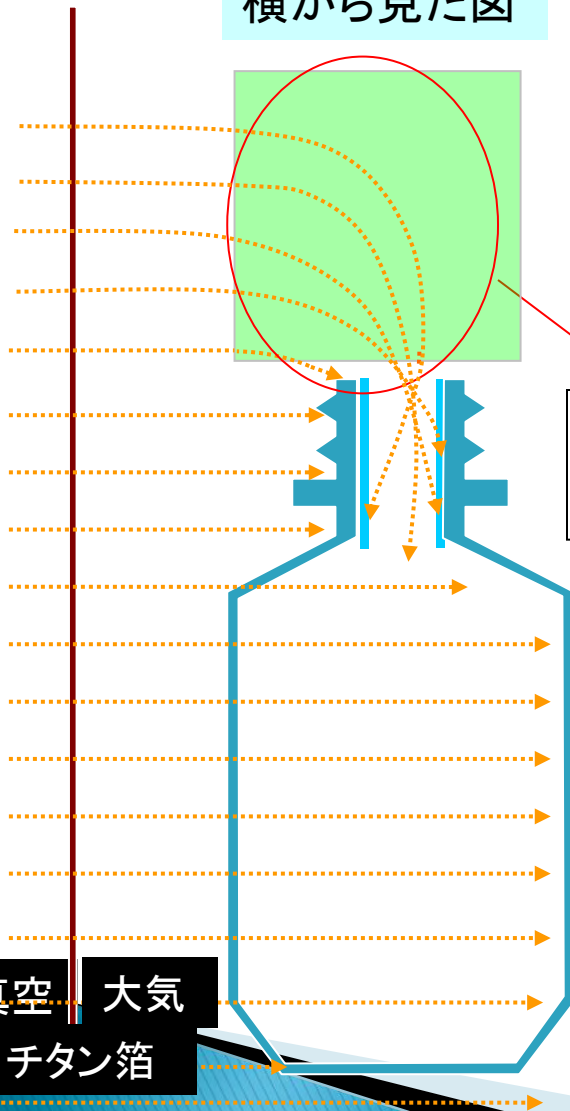
胴部0.1～0.3mm程度の厚さのため
電子線が透過する



**口部内面が吸収線量の一番低い
コールドスポットとなる。**

磁場による口部の照射効率UP

横から見た図

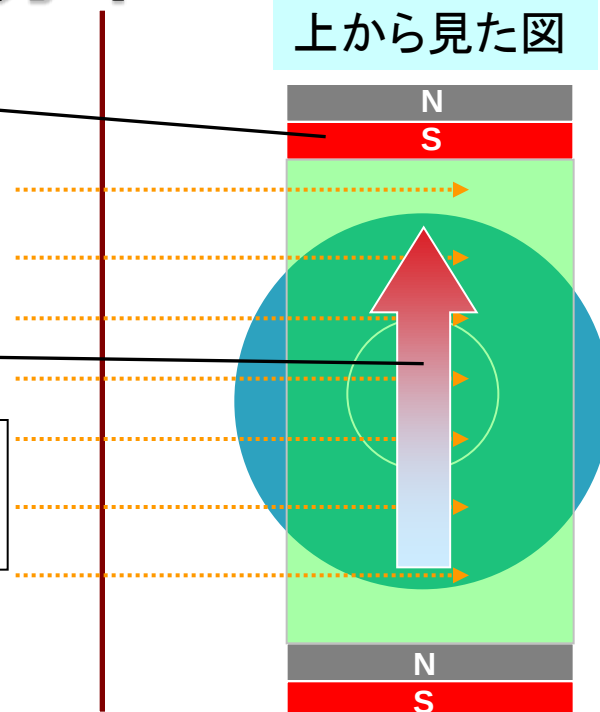


ボトル上部に磁石
を対向させ配置

磁場の向き

磁場により電子線が曲げられ、
口部内面に効率よく照射できる。

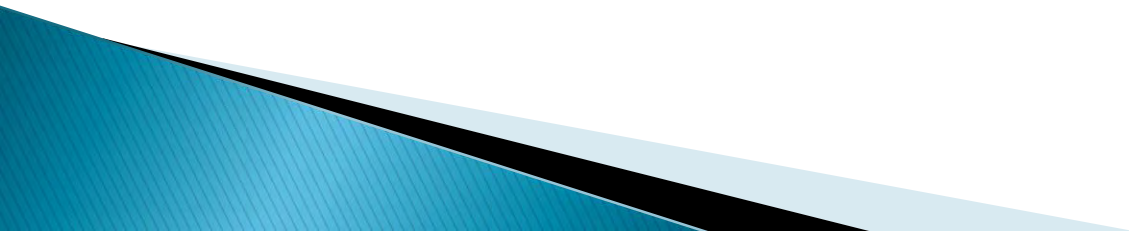
上から見た図



	磁石無	磁石有
電流(mA)	169	89
口部線量(kGy)	10.1	10.7
胴部線量(kGy)	79.5	43.5

- 容器の収縮や変形を抑制しながら、
殺菌性能の向上が図れる。
- 低い電流で口部内面線量が確保可能

放射光(X線)の応用



X線利用においては、その特徴として、

- ・電磁波であるため透過度が高い
- ・ビームとして高品質化ができる(放射光)
- ・発生エネルギー選別も可能
- ・屈折、干渉効果を利用できる
- ・イメージングが得意等
- ・加工へも応用可能(これを紹介)

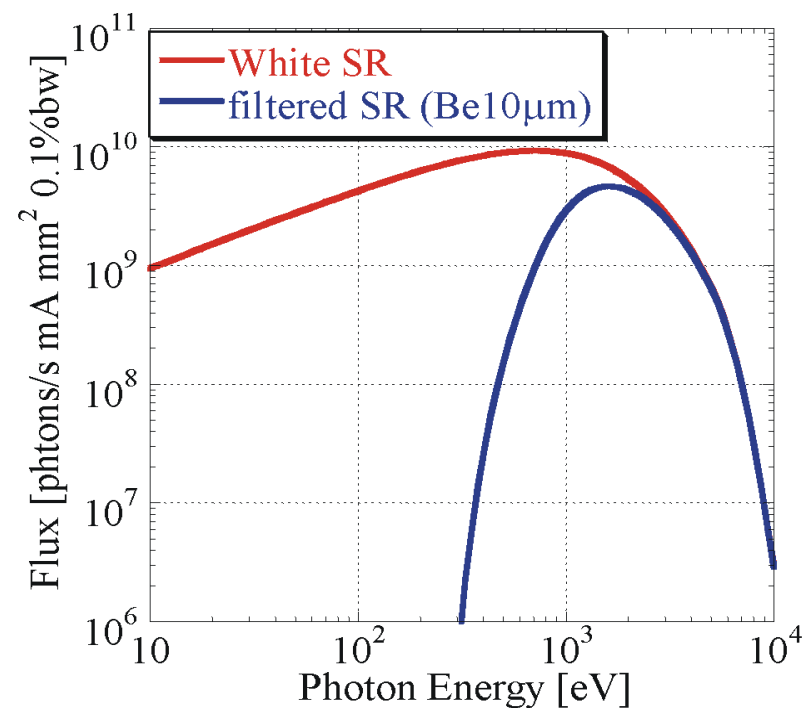
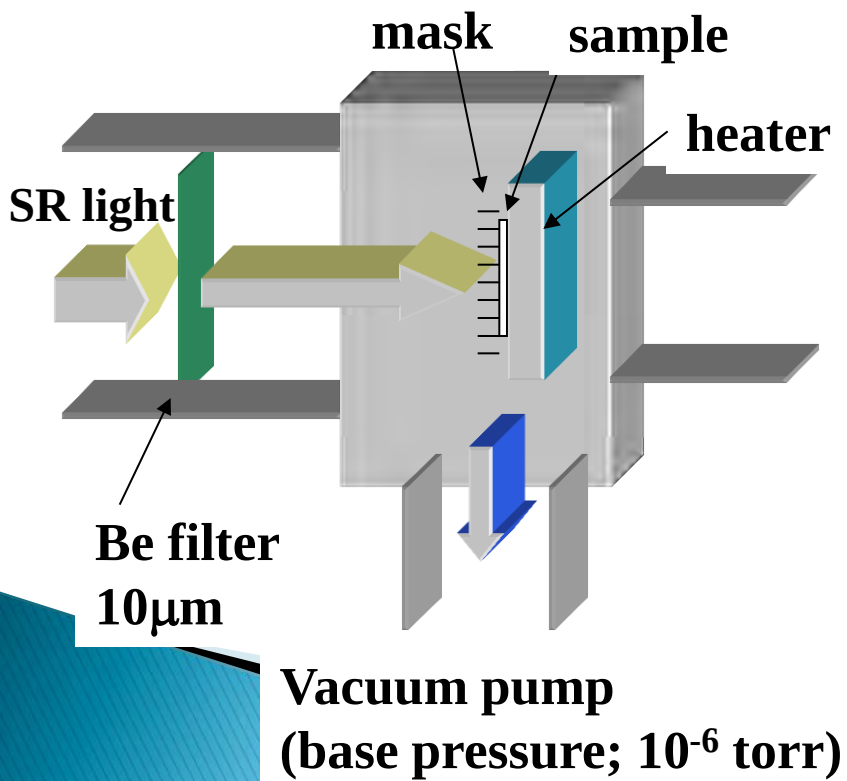
これらの特徴を利用して、主に分析技術への展開で大きなインパクトがあるが、直接エッチングやEUVリソグラフィなどにも応用が可能

放射光源

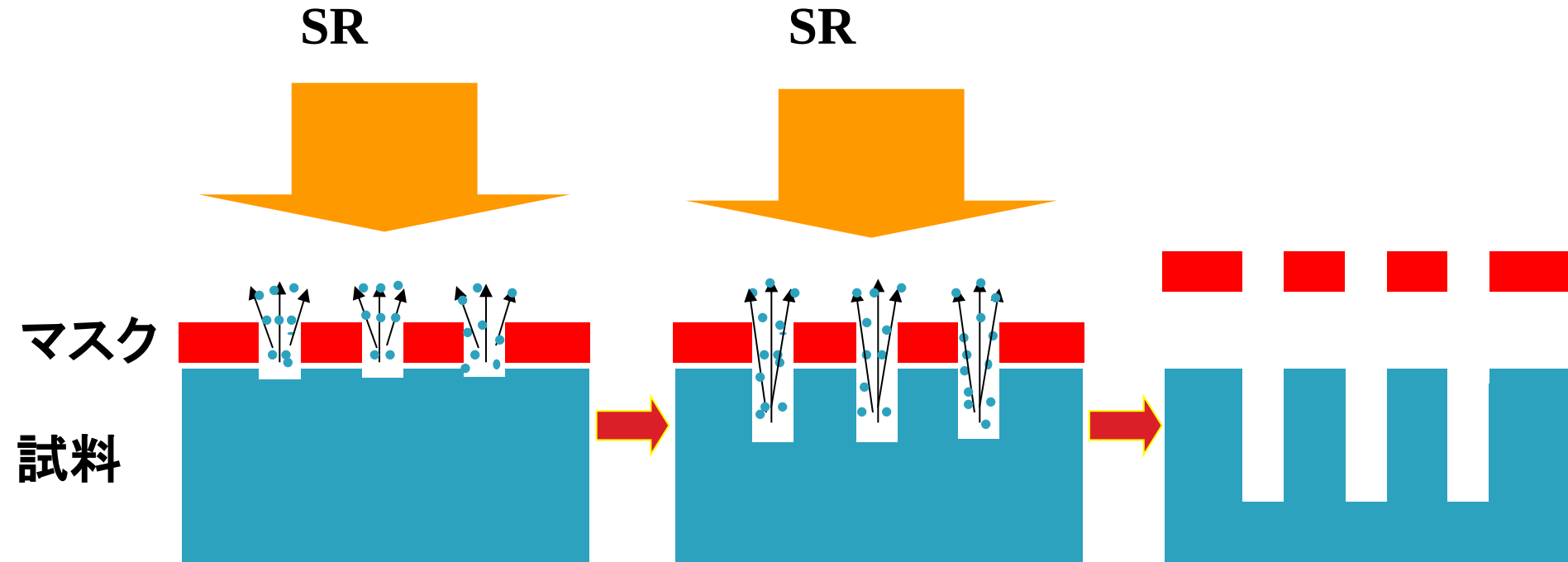
AURORA-2S

((株)住友重機械工業製)

- Max. Beam Current : 600 mA
- Electron Energy : 700 MeV



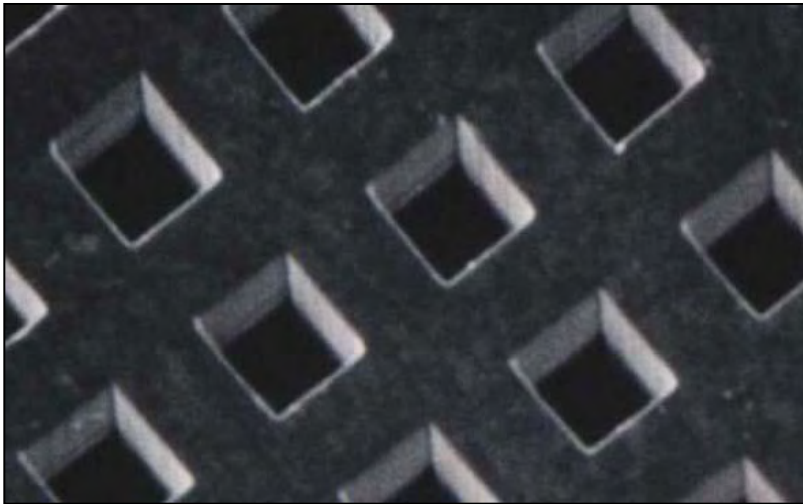
Microfabrication (TIEGA™)



Concept of direct photo-etching using SR

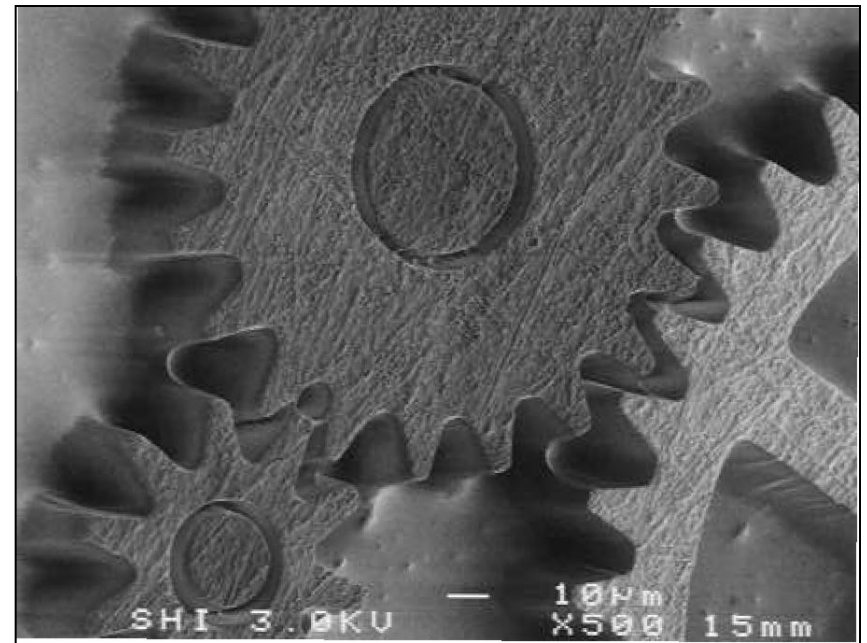
SR exposed region of sample decomposes and desorbs consequently. As a result, it is possible to create microstructures of fluorinated polymers by SR **without any chemicals and in single process** !

微細加工体の例



— 100 μ m

(a) マイクロフィルター



— 10 μ m

(b) マイクロギア

RX-PTFEから作製したマイクロパーツのSEM 写真

イオンビーム応用

薄層放射化法によるエンジンの摩耗測定 (豊田中央研究所)

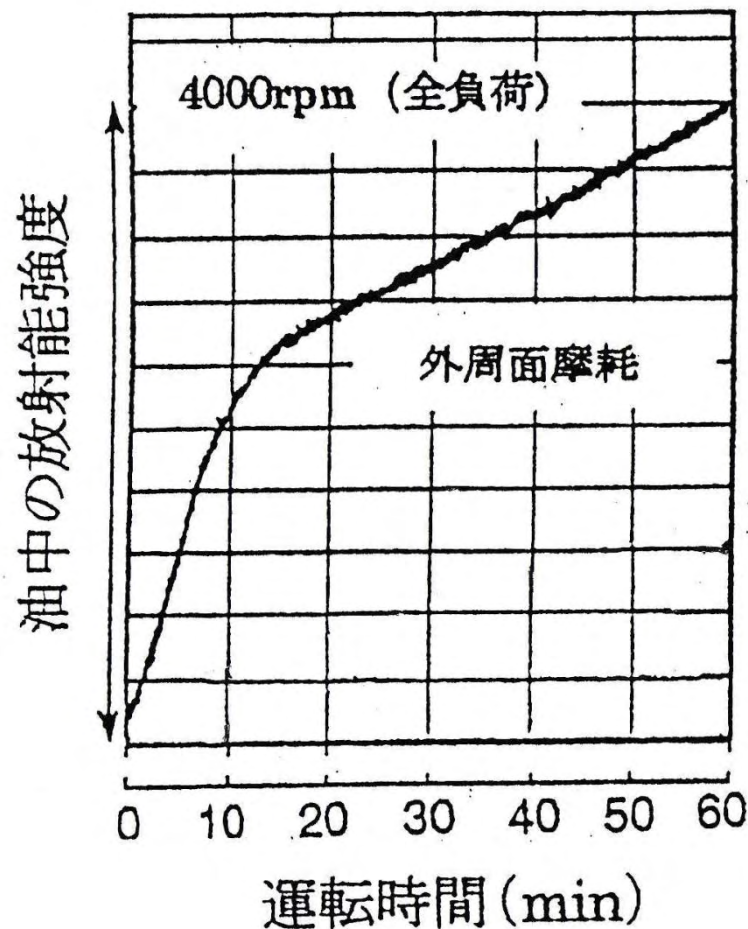
Technique

サイクロトロンからの陽子線、重陽子線、Heイオン等による金属部材の放射化

対象 ピストンリング摩耗 ⇒ 分単位での摩耗特性解明
 エンジンバルブ摩耗 ⇒ 摩耗の回転数依存性解明
 エンジンオイル開発 ⇒ 高温高せん断粘度最適化
 etc.

自動車のエンジン開発に活用中

ピストンリング(トップリング)の外周面摩耗計測への適用例



ピストンリングの摩耗計測チャート

農業応用

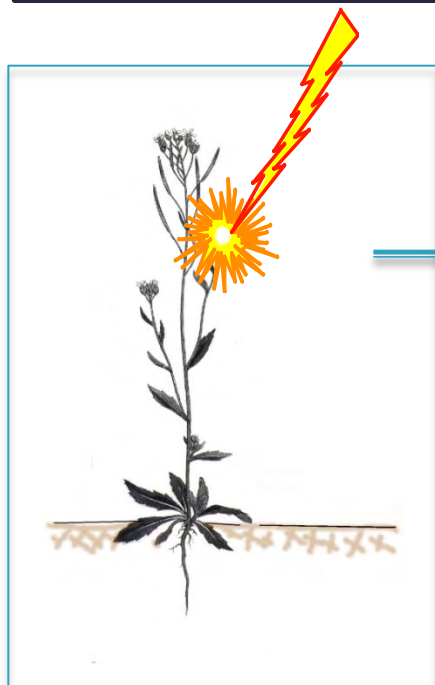
イオンビーム変異誘発とイオンビーム育種

イオンビーム

DNA損傷

DNA修復

変異



生物

細胞

DNA
DNAに傷がつく

正常に修復

間違って修復
変異DNA

変異遺伝子

変異体

有用品種
の作出・育種

イオンビーム育種





新花色キク
5品種
1998年発表
農業生物資源研究所



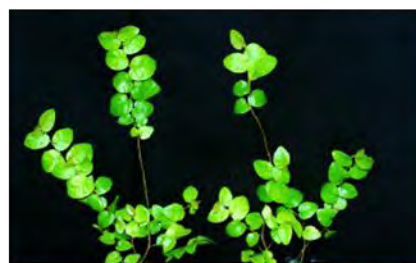
新花色カーネーション
8品種 2002年～
キリン研



新神
無側枝性省力栽培ギク
3品種 2005年～
鹿児島県



新花色オステオスペルマム
2品種 2007年～
群馬県



高環境浄化能オオイタビ
2007年
広島大学



低Cd吸収性 コシヒカリ
2012年
農業環境技術研



低温肥大性 温室メロン
2011年
静岡県



新花色芳香シクラメン
2品種 2012年～
埼玉県



甘い香りの吟醸酒用酵母
2012年 群馬県

放射線プロセスのこれからの展望

1. 歴史を振り返って

ずーっと順風で走ってきたものは？・・・

ポリエチレンの架橋は今でも大きな柱

タイヤ用ゴムの架橋も大きな柱

これらはなぜ生き残った？

⇒ プロセスが簡単、他の方法でコスト・品質が達成できなかった？

ライフサイクルが従来技術と変わらない

死んでしまった、あるいはほとんど動かない技術

フロッピーディスク製造（需要がなくなった）

トンネル内装鋼板（需要がすぐ頭打ち）

転写印刷技術（代替手段が発展または技術が要らなくなった）

王子製紙のスーパーミラー（使用後の処理に問題）

等

放射線プロセスのこれからの展望(2)

2. 生き残っている技術、生き残れる技術
社会インフラの底辺を支えているもの
他に代わる技術がコスト高あるいは性能が劣るもの

3. こんなプロセスなら生き残る？
放射線を使うだけでほぼできるもの(発泡ポリエチレンや架橋フィルム)
放射線がなければできないもの ⇒ 医療等
作ったものが継続的に使われるもの
環境負荷の小さな技術(水を使わない等) ⇔ PETボトル製造ライン

これら以外の巨大科学技術

J-PARCプロジェクト	JAEA & KEK プロトン＋中性子科学
RIビームファクトリー	理研 不安定核、新元素
X-FEL	理研播磨 超短パルスX線
SuperKEKB	KEK 電子・陽電子衝突 標準理論を越えて
来るべきILC	日本国 & 世界各国 超伝導技術、材料技術 真空技術、大電力技術 国際的研究センターほか

最後に、放射線プロセスが発展した陰には、最先端科学としての加速器の誕生が大きな意味を持っていた。その時は、加速器はただ核物理の実験装置だった！

本当に新しい放射線プロセス技術は実は最先端科学の中から生まれてくるのだと考える。

謝辞

本講演を行うにあたり、数多くの方々から、御助言、資料等をいただきました。

特に、
住友重機械工業の加藤隆典様をはじめとする多くの皆様、
住重アテックスの山瀬豊様、
澁谷工業の皆様(特に中専務)
大日本印刷の皆様
(株)環境浄化研究所の皆様
TPR(帝国ピストンリング)の山本様
鷺尾研の歴代のメンバー

から、たくさんの資料、知識、情報を頂戴しました。ここに厚く御礼申し上げます。

ご清聴ありがとうございました。

