

特別講演

放射線による照射効果

理化学研究所 仁科加速器研究センター
神原 正

生体も含めた物質に対して放射線が与える照射効果の元は、放射線が物質を構成する原子に受け渡すエネルギーである。また照射効果には、放射線粒子による直接電離だけでなく、電離で生じた二次電子による効果、さらに溶液の場合はラジカルによる効果などがある。放射線照射を受けた物質の構造や物性の変化は、放射線の種類とそのエネルギーによって大きく異なる。

ここでは、実用に供せられることの多い放射線の例として、高速のイオンビームおよび高エネルギーの光子（X線・ガンマ線）を取りあげる。高速イオンも光子も粒子としての性質を持ち、原子と衝突して軌道電子にエネルギーを与えるが、それについて衝突過程と照射効果の特徴を、主として放射線物理の立場から概説する。

高速のイオンが原子の近くを通過すると、原子の軌道電子がイオンからの静電気力を受ける。それが十分大きければ、電子はより高いエネルギー状態に励起あるいは電離され、イオンは運動エネルギーを失い減速される。イオンの原子番号が大きいほど静電気力が大きく、イオンの軌道に近い原子ほど電離・励起がされやすい。一方、イオンの速度が大きいほど静電気力の働く時間が短いので、電離・励起は起こりにくくなる。物質に入射した高速のイオンは原子と衝突を繰り返して減速され、最後には停止するが、その際イオンの軌道に沿った柱状の領域内に大きなエネルギーが与えられる。またイオンが遅くなるほどエネルギー付与が大きいので、イオンが停止する直前すなわち軌道の末端附近でエネルギー密度が最大になる。

X線やガンマ線のような高エネルギーの光子は高速イオンにくらべて原子と衝突する確率が格段に低い。イオンが物質中で出会う原子と次々に衝突するのに対して、光子は物質中をある距離通り抜けてから原子1個と衝突して電離を起こす。衝突の過程は光子のエネルギーにより異なり、X線領域では光電効果、Co-60のガンマ線の領域ではコンプトン効果、それ以上では電子対生成が主な素過程である。いずれも衝突の場所から二次的な電子が放出されて更なる電離を引き起こす。

このようにイオンと光子では衝突の素過程が異なるので、物質を同じ吸収線量で照射しても、ナノスケールで見ると照射効果を受ける領域の幾何学構造が異なる。光子は物質中にはほぼ一様にランダムに分布した点状の領域にエネルギーを与えるのに対して、イオンはその軌道に沿った柱状の領域に大きなエネルギーを与える。このため、重イオンで照射では、セラミック・ポリマーのような材料の中に柱状の欠陥を形成することができる。また生物の照射ではDNAの二本鎖切断を引き起こす確率が大きいなどの特徴がある。講演では無機物および生物に対する照射効果の例を示す予定である。

放射線の照射効果

理化学研究所
神原 正

放射線

- 放射線には起源も性質も異なるいろいろな種類がある。
- α線、β線、電子ビーム、イオンビーム(高速の荷電粒子)
 - X線、γ線(高エネルギーの光子)
 - 中性子
 - ミュオン、反陽子

自然放射線源	人工放射線源
・長寿命の放射性核種	・X線発生装置
・宇宙放射線(ミュオン・中性子)	・加速器(イオンビーム、電子ビーム)
・宇宙放射線起源の短寿命核種	・放射光施設(X線)
	・原子炉(中性子)
	・人工放射性核種

放射線に共通の性質

- 粒子の性質を持つ。
- 真空中を直進して、エネルギーを運ぶ。
- 物質中も透過する。
- 検出・計数ができる。
- 電離・励起作用、化学的、生物学的作用がある。

放射線の作用	利用例
透過・吸収・散乱作用	厚さ計
	非破壊検査
	X線診断
電離・励起作用	煙感知器
	ラジアルタイヤ、耐熱性電線
化学的作用	医療機器の殺菌
	作物の発芽防止
生物学的作用	品種改良
	がんの治療

放射線と物質

- 放射線粒子が物質を構成する原子と衝突して電離する。
- 物質にエネルギーを与える。
- 放射線はエネルギーを失う。
- 放射線が通過できる物質の厚さは有限である。



照射効果

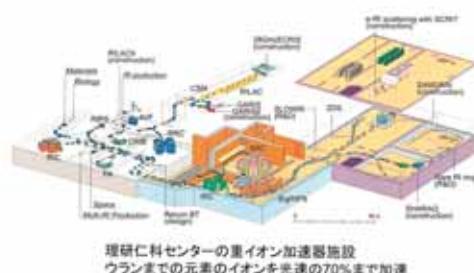
- 照射効果の元はどんな放射線でも物質でも同じ。
- 放射線の粒子が物質中の原子を電離あるいは励起する。
- 化学結合の切断・構造変化・原子の移動が起こる。
- さらに、二次電子やラジカルの効果が加わる。
- 照射効果は放射線の種類により異なる。
- 透過しにくい放射線はエネルギーを与えやすいので、効果が大きい

2つの例

- 高速のイオン
- 高エネルギーの光子(X線、ガンマ線)

高速のイオン

イオンは電離した原子でプラスの電荷を持つ。
放射性核種からのアルファ線(ヘリウム原子核 光速の10%くらい)
人工的に作るイオンビーム(いろいろな元素で光速近くまで加速)

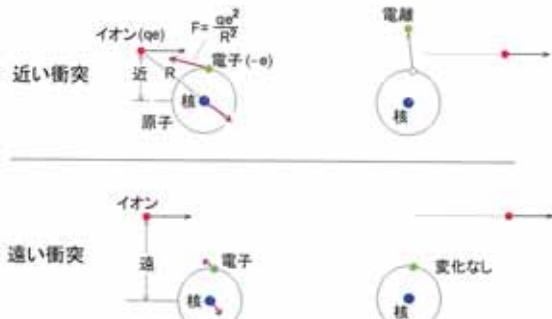


高速イオンと原子の衝突

- ・イオンと物質中の原子が衝突して、原子が電離・励起される。
- ・イオンが原子の近くを通過するときに、逆向きのクーロン力(原子核に斥力、電子に引力)を及ぼす。
- ・その力で原子から電子が飛び出す(電離)。
- ・そのため、イオンはわずかに遅くなる。

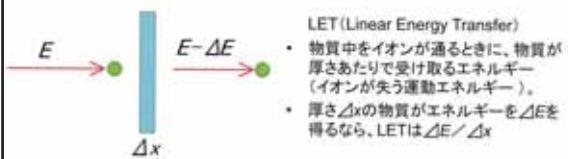


近くを通過するほど電離は起こりやすい

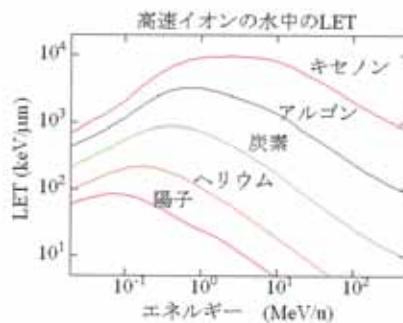


物質中の高速イオンとLET

- ・イオンはほぼ直進しながら次々に原子と衝突する。
- ・通路周辺の原子にエネルギーを与え電離や励起をする。
- ・電離により、化学変化・物性変化のような照射効果が起こる。
- ・照射効果をうける領域はほぼ直線状である。
- ・また二次電子、ラジカルの効果も重要。
- ・イオンはだんだんと減速され、最後には停止する。

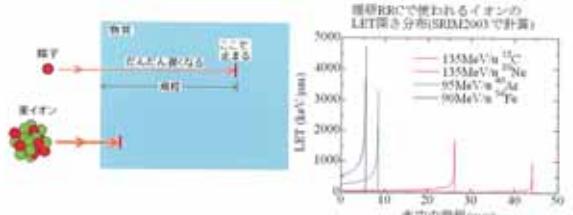


重いイオンほどLETが大きい

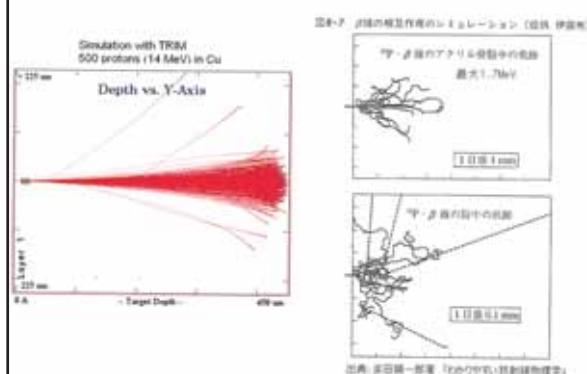


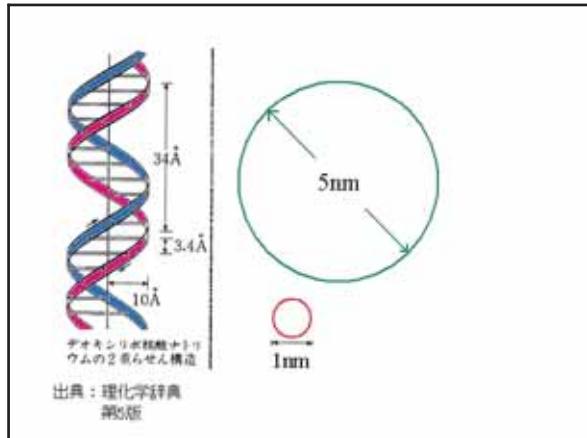
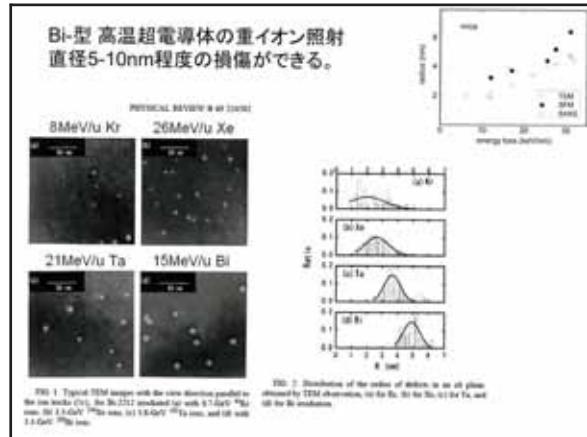
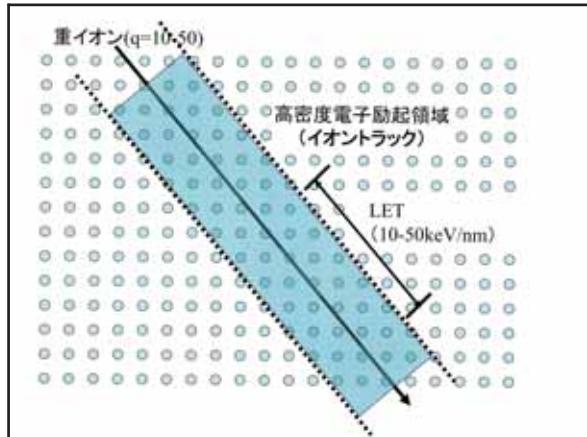
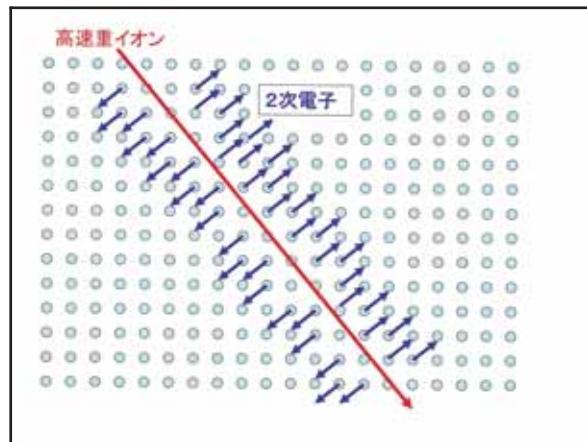
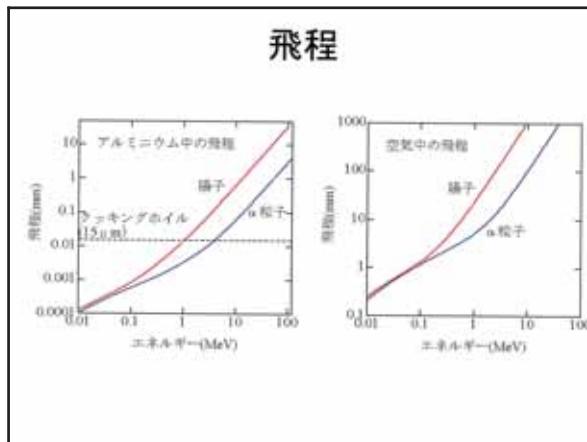
飛程とプラックピーク

- ・飛程: イオンが止まるまでの距離。
- ・同じエネルギーなら重いイオンほど飛程が短い。
- ・LETは飛程の末端付近で最大になる。プラックピーク
- ・物質内部の狭い領域に集中的に損傷を与える。



イオンと電子の飛跡 シミュレーション





光子と物質

- 波長 λ の光は hc/λ のエネルギーを持つ粒子(光子)とみなせる。
- たとえば波長1nmのX線は約1.2keVのエネルギーを持つ。
- 波長と発生源により軟X線、X線、 γ 線に分類される。
- 光子と原子の衝突は光電効果、コンプトン効果、対生成の3種類
- 衝突は1回だけ、原子と衝突した光子は、消滅するか方向とエネルギーを変える。
- 衝突に伴って放出される電子(反跳電子・オージェ電子)が照射効果を起こす。
- 衝突確率は光子のエネルギーと物質の種類により大きく異なる。

