
原子力開発の歴史

物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

物質の根源を求めて:素粒子とは何か

千差万別の物質は百種類ほどの**原子**からできている

原子は「**物質を構成する最小の要素**」
という意味で名付けられた。

しかし、

原子(1億分の1センチメートル程度)→**原子核+電子**

原子核(原子の大きさの1万分の1)→**陽子+中性子**

素粒子とは？

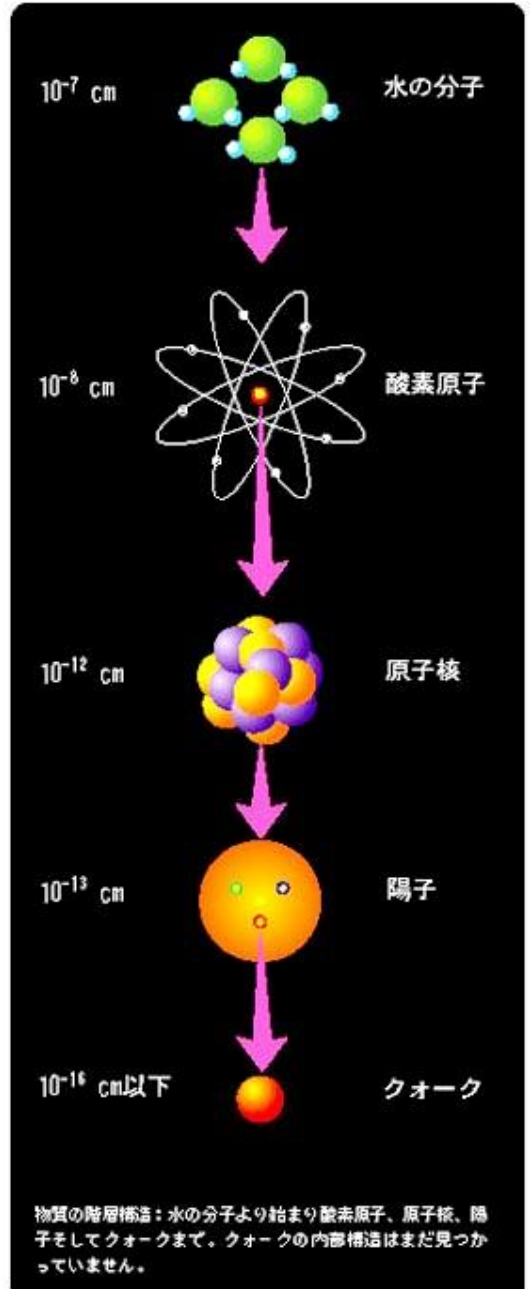
それ以上分割できない、
内部に構造を持たない点状粒子

このような物質の**階層構造**はどこまで続くのか？

素粒子とは一体どのようなものか？

物質の基本的な構造、力の根源を解き明かす

→**高エネルギー物理(素粒子発見)の歴史**



物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

原子論の始まり

古代ギリシャ哲学(BC5-4世紀)

「この世界は、いったい何からできているのか」という思弁的な問い

→思弁をもって解答することがほとんど唯一の方法論

デモクリトス:「物体は無限に分割できるか」

→無限小の物体などあり得ない

→有限の大きさを持つ分割不能な構成要素がある

哲学的な不可分の究極粒子=「原子(アトム)」

ギリシア語:「ア(否定)」+「トモス(分割)」

運動を実現するもの=「空虚(ケノン)」



アリストテレス:

「何もないことを唯一の根拠とする存在があり得るか」

→真空の存在を否定

→原子論の否定

→中世スコラ哲学(数学的自然観)全盛へ

原子論の始まり

16世紀:新元素の発見、冶金技術の進展、化学知識の普及

1637年:デカルト(仏)

真空の存在を否定

→空間は「エーテル」により満たされている

1643年:トリチェリー・ヴィヴィアーニ(伊)

真空実験により真空の存在を示唆

→スコラ哲学の教義の1つ(自然は真空を嫌う)を否定

トリチェリはガリレオの弟子

1648年:パスカル(仏)

大気圧の存在を示す

→真空嫌悪への一撃(デカルトへの反証)

科学的実験による実証法の開拓

1661年:ボイル(英)

ボイルの法則→アリストテレス的真空嫌悪の否定

錬金術批判、基本的元素の考え方

古典論(光学、電磁気学)の勃興

1672年: ニュートン

運動方程式 → **ニュートン力学**

分光学の創始: **光の粒子説**

「偏極 (polarization)」、「スペクトル」という用語の創出

1678年: ホイヘンス(蘭)

光の波動説、エーテルの存在

1859-61年: キルヒホッフーブンゼン(独)

火炎スペクトルの研究と暗線の発見 → **原子分光学の創始**

1864年: マックスウェル(英)

マックスウェル方程式 → 電磁気学

1887年: アルバートA.マイケルソンーエドワードW.モーレー(米)

マイケルソンーモーレーの実験 → 「エーテルの風」の痕跡がない

1895年: ローレンツ

ローレンツの短縮仮説 → **ローレンツ変換**へ(1904年)

マイケルソンーモーレーの結果を説明

物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

力学的な理論:原子論的な世界像

ニュートン:「時間-空間-物質」

すべての存在を、空間の特定地点に位置する**原子の集まり**

素粒子発見の幕開け(19世紀の末頃)

大半の科学者が**原子を実在的なもの**として認める

哲学的な発想がかなり薄くなった

実証的な方法論(実験と理論)

しかし、「**自然とは何か**」という探求心は失われたわけではない

技術的に操作する可能性については、

まだ誰も考えが及ばなかった

科学が産業発展の先導役を果たすようになる

(20世紀初頭)

電子が、100年の後、**エレクトロニクス技術の基礎**

テレビ、パソコンを始めとする**高度情報化社会**を創出

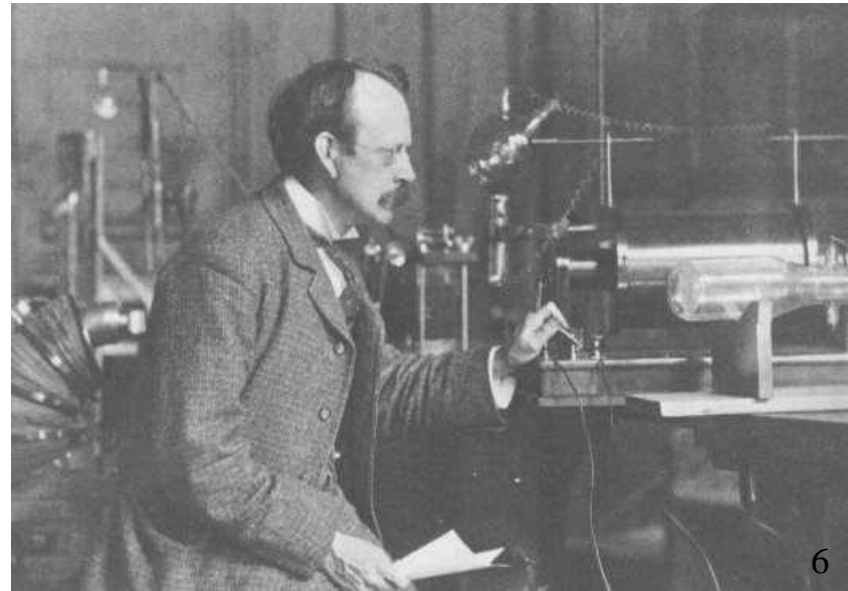


力学的な理論:原子論的な世界像

1891年: ストーンー(アイルランド) or ファラデー
電気は物質の基本粒子中に存在→「**電子 (electron)**」の命名

1896年: ゼーマン(蘭)
ゼーマン効果の発見
原子スペクトルの磁場による分離
水素と電子の質量比を1600:1と求めた
スペクトル研究、量子論の誕生に大きな影響を与えた

1897年: J.J.トムソン
電子の発見(陰極線の粒子性)
比電荷 e/m を求めた
この比電荷はゼーマン効果より求めたものと一致
素粒子発見の第一号



力学的な理論:原子論的な世界像

1928 ディラック(英)

ディラック方程式:電子の相対論的波動方程式
反粒子の存在予言、スピンの量子論的説明

1930年:パウリ

β 崩壊に伴う**ニュートリノの存在予想**

「破れかぶれの方法」として「核の中にスピン1/2の中性微粒子」
最初ニュートロンと呼んだが、

中性子にこの名前は与えられ改めて命名

ニュートリノの命名はフェルミ(1932年)

1932年:アンダーソン(米カリフォルニア工科大:ミリカンの弟子)

宇宙線内に**陽電子の発見**

反粒子の検証→**素粒子物理学の誕生**

ディラック:「方程式は、私より利口だった」

力学的な理論:原子論的な世界像

1947年:パウエル(英)、ラッテス

π 中間子の確認

1948年:オイゲン・ガードナー、ラッテス(カリフォルニア大)

π 中間子(正・負)の人工創生(バークレーのコスモトロン)

1950年:モイヤーと学生たち(バークレー)

中性 π 中間子の発見

1950年代以降:

高エネルギー加速器を用いて次々に新粒子発見→「**粒子の動物園**」

1960年代後半:この状況が変り始めた

粒子の分類に基づいた理論的な推測+実験

現在の所、物質の**素粒子**と考えられているもの

ハドロンを作る**クォーク**(強い相互作用、電磁気力の100倍)

電子、ニュートリノ、ミューオンなどの**レプトン**(弱い相互作用)

物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

原子(核)物理学:「アトム」を求めて

1766年:キャベンディッシュ(英)

水素の「発見」

1774年:プリーストリ

酸素ガスの発見

1787-1789年:ラヴォワジエ(仏)

「化学命名法」→物質を構成元素で呼ぶルール^{の確立}

「化学要論」→33種類の新元素を説明、熱素も含まれていた

徴税請負人であったため、フランス革命で断頭台の露と消えた

1803年:ジョン・ドルトン(英)

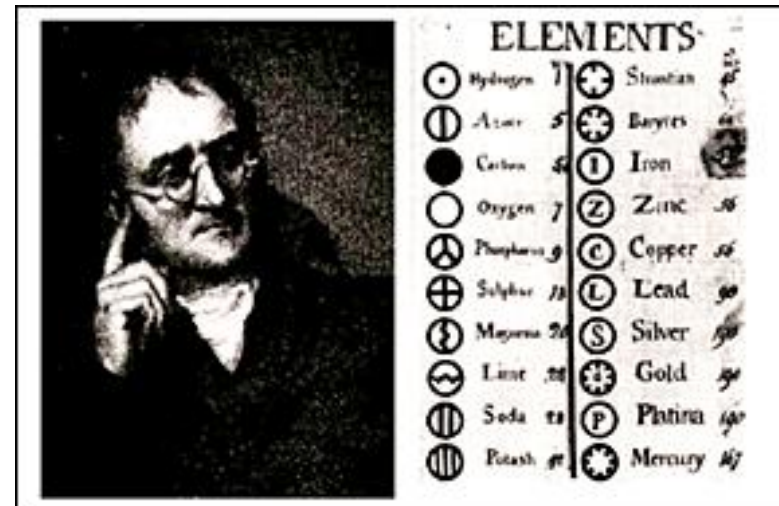
原子論:当時の化学を集大成

(質量保存の法則、定比例の法則、
分圧の法則、ヘンリーの法則)

原子それぞれに「絵記号」をつかった

原子量の概念の導入とその決定

→アボガドロ数



物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

原子(核)物理学:「アトム」を求めて

1807-1808年:デイヴィー

元素を電気分解により単離して発見:K, Na, Ca, Sr, Ba, Mg

1811年:アボガドロ(伊)

現行の**元素記号の多くを決定した**

1815年:プラウト(英)

プラウトの仮説→**原子番号の概念**

「すべての原子は水素よりなり, 水素の個数の違いにより区別される」

元になる水素を「原質」という意味で「プロタイル」と呼ぶことを提案

(「プロトス(最初の)」+「ハイル(物質)」)

これにちなんで、ラザフォードは**陽子をプロトンと命名**

1869年:メンデレーフ(西シベリア)

元素周期表の発表(1→7→17の元素)

1871年:更に空欄つきの周期表を発表

→**未発見の元素を予言(32番:Ge)**

物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

原子(核)物理学:「アトム」を求めて

1896年:ベクレル

放射能の発見→原子核物理学の起こり

1901年:ペラン「原子の核-惑星構造説」

1903年:長岡半太郎「原子構造の土星モデル説」

1903年:J.J.トムソン「最初の原子モデル
(干しブドウ入りケーキモデル)」

1911年:ラザフォード

散乱実験→原子核の存在を推定(陽子がぎっしりと詰まっている)

1913-1914年:H.G.J.モーズリー(英)

特性X線のモーズリーの法則:原子番号とスペクトル振動数の関係
→ボーア原子モデルの支持、化学元素概念の決定的確立

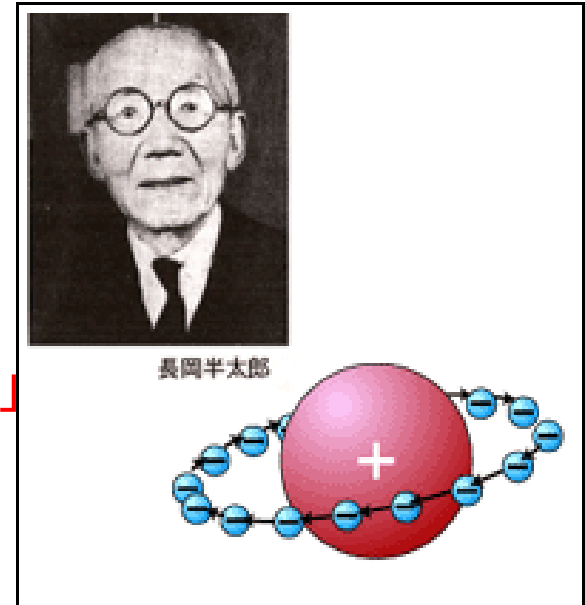
メンデレーフ周期表を原子番号順に修正

ノーベル賞間違いなしだったが、翌年大戦に参戦、27歳の若さで戦死

1916年:ルイス、ラングミュア(米)

電子と化学結合の関係(両者別々に提唱)

最外殻8電子が安定→周期表の規則性を説明



物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

理論物理学:物質と力の統一解釈へ

16世紀後半:ガリレイ

物理理論を立証するための実験(科学的研究法)

1687年:ニュートン

運動方程式→古典力学の起こり

万有引力の法則→基本的な力

1855年:マクスウェル

マクスウェル方程式→電磁気学

光は電磁波であると予言

1905年:アインシュタイン

特殊相対性理論(時間と空間は時空に統一)→相対論的力学の構築

エネルギーと質量の同等性: $E=mc^2$

1915年:アインシュタイン

一般相対性理論で重力を説明→万有引力の法則を置換

低質量かつ低エネルギーの領域ではニュートン力学と一致

機械的原子論の終焉

古典論的物質像への疑念: 原理に関わる問題点の露呈

物質の安定性

原子同士の結合による安定分子形成過程を理論的に説明できない

放射理論の破綻

高温金属が発する光のスペクトル実験を再現不可: 産業応用上重要

ウィーン: 一般的な放射理論 + 半経験的な方法論

(短波長でのみ実験と一致)

レイリーとジーンズ: 電磁気学 + 熱力学 (長波長でのみ実験と一致)

1911年: 解答を迫られる難問

ラザフォードが考案した太陽系型原子模型: 直観的にはわかりやすい

電子が原子核の周りを周回していると考えると、

マクスウェルの電磁気理論に従って必ず電磁波が放出され、

電子はエネルギーを失い、原子核まで落ち込んでいく

当然、原子構造は崩壊し、すべての物質は跡形もなく潰れてしまう

そうならない理由を古典物理学の中に見いだすことはできなかった

コラム:ラザフォード



最大の業績:原子核の発見

「(原子)核物理学の父」、J.J.トムソンの弟子
←それまでは、正の電荷が連続的に分布し、
その中に電子が浮かんでいるモデル
それ以外の描像では、原子の安定性を
説明することが困難だった

例、惑星モデル、土星モデル

1898年:ウラン中の α 線、 β 線の区別発見(命名もラザフォード)

アルミ箔に対する透過率の違いより

1906年以來: α 線を金箔に照射して散乱させるという実験

1909年:この実験の変形版を若いマースデンにやらせてみようと考えた

それまでの実験: α 線源→金箔→測定器

新しい実験: α 線源→測定器→金箔(α 粒子の大角度散乱の研究)

ラザフォード自身は、巨大なエネルギーを持つ α 粒子が

跳ね返されるとは、思っていなかった。

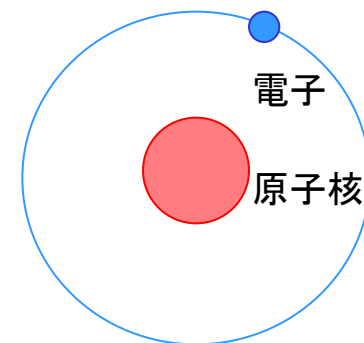
コラム:ラザフォード(2)

ラザフォードの回想、『電子と原子核の発見』より

「2~3日して、ガイガーが非情に興奮してやってきて、
『何個かの α 粒子が後ろに跳ね返されるのを見つけた』と言ったのです。
これは、それまでの私の生涯で起きた最も信じられないものでした。
もし、みなさんが、1枚のティッシュペーパーめがけて
15インチ砲弾を撃ち込んだところ、
それが跳ね返ってきてみなさんに当たったとしたら、
それを信じられるでしょうか」

1911年:「太陽系型」の原子モデルを発表

中心に原子質量の大部分を有する原子核が存在する
もちろん、このモデルは、原子の安定性を説明できない
しかし、大角度散乱の実験結果を再現する
唯一のモデル(強い説得力)



安定性の謎が解明されるには、

ボーアらによる量子論の展開を待たなければならない。

前期量子論の発展

1900年: マックス・プランク(独)

プランクの放射公式: 統計力学的に物理的な意味を解明

レイリー-ジーンズとウィーンの公式を統一

振動数 ν の電磁波を吸収・放出しながら平衡状態に達している物体

電磁場とやりとりするエネルギーが $h\nu$ の**整数倍と仮定**

h は後に**プランク定数**と呼ばれる基本定数である

古典的な物質像を根底から覆す**量子論の始まり**

1905年: アインシュタイン

光量子論

物質と相互作用している光(=電磁波)が

エネルギー $h\nu$ の固まり(量子)として空間中に存在

光は「波」の性質だけではなく、「**粒子(量子)**」の性質も持つ

光量子論を前提とするときわめて明解に説明できる現象

光電効果(以前に発見はされていた)

コンプトン効果(1923年に発見)

原子力開発の歴史

基礎的な発見等

1789年: マーチン・クラプロート(独)

ウランの発見

その8年前に発見されたばかりの天王星にちなんでウラニウムと命名

1895年: レントゲン(独)

X線の発見: 「未知のもの」の意

紙で覆ったクルックス管の先にあった蛍光板が光った

発明者のクルックスはメーカーに苦情を言った?

1896年: A.N.ベクレル(仏)

ウラン塩の放射能発見(ウラン線と呼ばれる)

1898年: キュリー夫妻(マリー & ピエール)

放射性元素(ラジウム、ポロニウム)の発見

「放射線」「放射能」という用語を創出

1934年: 夫人は67才の時、白血病で死去

実験ノートはいまだに通常以上の線量が観測される

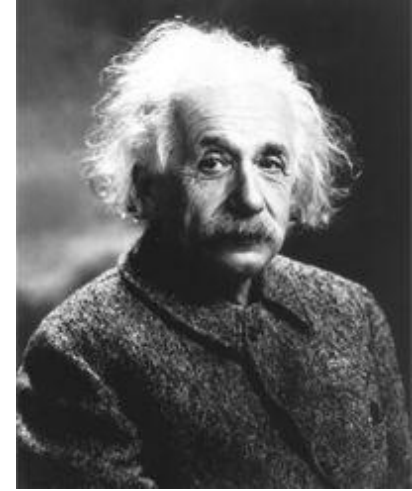
実験ノートの1冊は、東京都日野市の明星大学に現存?

1905年: アインシュタイン

特殊相対性理論: 質量はエネルギーに変換され得る($E=mc^2$)

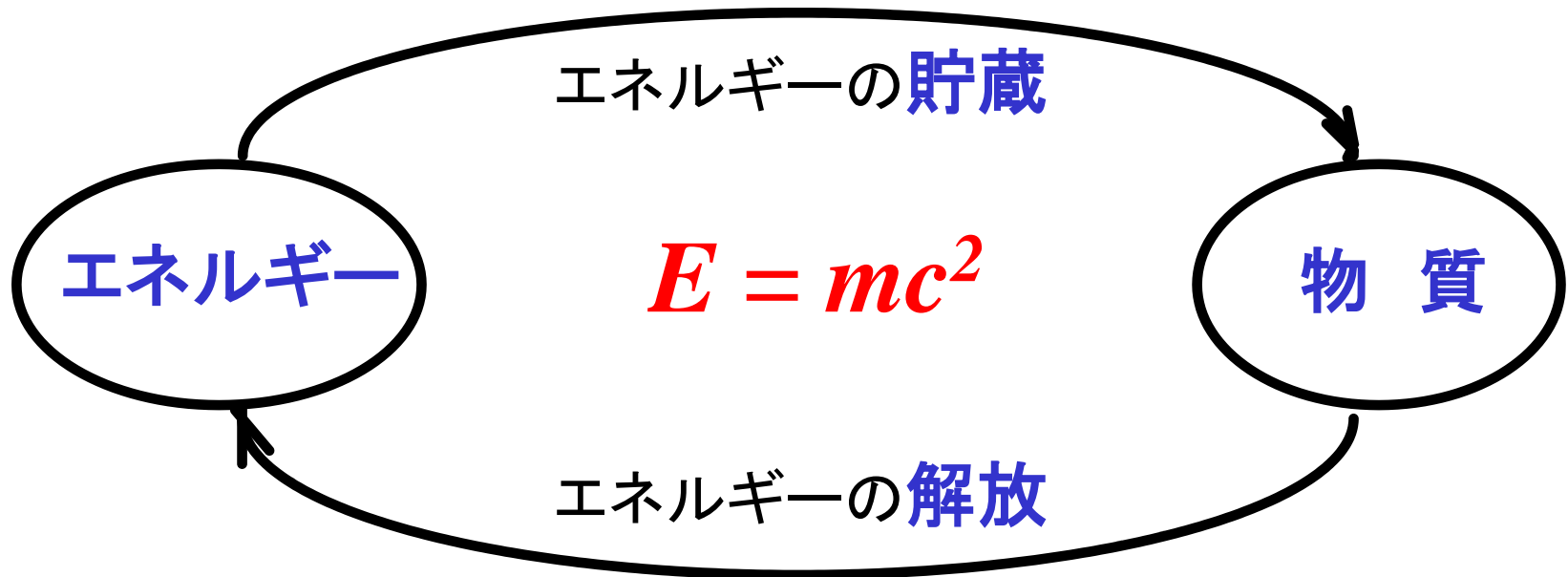


コラム：質量がエネルギーになる？



アインシュタインの特殊相対性理論

宇宙における元素合成、超重核の合成



核分裂、核融合、核破砕

コラム:この時代の原子核研究成果の初期の技術的応用

ラジウムの異常なほど積極的な利用:一種のラジウム信仰
当時はきわめて珍しかった女性の科学者が発見したこと
その内に有する巨大なエネルギーを絶えず放射していること
鉱物であるにもかかわらず暖かさを感じさせること
ガン、心臓病、結核、精神病などの治療に効果があると信じられる

1931年の調査によれば、全米の287病院と414人の開業医がラジウムを使用

ラジウムが放射する神秘的なエネルギー→健康増進

放射性ハミガキやヘアトニック

肌を輝かせるというラジウム入りクリーム

強壮作用のあるラジウム・ウォーター等

利用者の中にはこれが原因で致死的なガンに罹患した人も多い

→ラジウム治療を押し進めたマリー・キュリー自身にも若干の責任

→それ以上に、科学に無理解なまま

無邪気にその成果を受け入れる側に問題(現在は逆?)

コラム:この時代の原子核研究成果の初期の技術的応用2

これと良く似た現象はX線についても見られる

パリ万博で喧伝された**人体を透視する神秘の光線**
多くの場合、**見せ物以上の利用はなされなかった**

発明家エジソンがこれを医療に利用することを考えた

X線が**コンスタントに放射され続けている所に患者を立たせ、**
前面においた蛍光スクリーンで観察するという物騒な方法だった
被験者や技師に**傷害を負わせる結果**になった
女性の服だけを透視するX線メガネも登場?

1925年:**国際放射線防護委員会(ICRP)が成立**

一般人に対する**放射線許容量についての勧告案**を发表
X線照射→**放射線障害**(皮膚ガンの発生、白血球の減少、無精子症等)
生物的影響が十分に知られないまま利用が急速に普及した問題

量子力学の技術的な応用

最初の具体的な成果:**原子爆弾の開発**
半導体研究に応用(江崎ダイオード等)



前期量子論の発展

1913年: ニールス・ボーア (デンマーク)

原子中の量子論: 原子模型の問題に対しての1つの解決法

原子核を周回する電子の**角運動量** (回転運動の保存量):

$h/2\pi$ の**整数倍** → 電子の運動も**量子化**

2つの制限条件による**原子の量子論の創始**

1) **量子条件**: 電子軌道に沿った作用積分は **h の整数倍**

2) **振動数条件**: 定常状態間の量子飛躍は**非連続的**であり、
エネルギー差は光量子となり外部に放出され、
振動数はプランク-アインシュタイン関係式を満たす

1923年: コンプトン (米)

コンプトン効果の発見 (X線散乱) → **光子の存在** ($h\nu/c$ の運動量を運ぶ)

1924年: ド・ブロイ (仏)

物質波の理論 → 電子の「波長」: h/mv (m : 電子の質量、 v : 速度)

この波長を持つ波が原子内部に**定常波として存在すると仮定**

→ ボーアによる角運動量の量子化が自然に導かれる

「粒子-波動の二重性は自然界の基本的な性質」と主張

量子力学の誕生

1925年: パウリ

排他原理を発見

1925年: ボルン-ハイゼンベルグ

物理量を行列で記述→「行列力学」

交換関係が物理量の時間変化を導く→運動方程式

状態間の遷移: 時間軸に沿った連続的な変化ではなく「量子飛躍」

1926年: シュレディンガー

シュレディンガーの波動方程式→「波動力学」

水素原子の場合にこれを解くと、

ボーアが半古典的な手法で求めた角運動量の量子化が、

定常状態の解の特徴として自然に導かれる

行列力学と波動力学が数学的に同等であることを証明

1926年: M. ボルン (独)

波動力学の確率解釈提唱

衝突のボルン近似

物質・力の根源を求めて(哲学と物理学)

理論物理学:物質と力の統一解釈へ

1900年代初頭:プランク、アインシュタイン、ボーアたち
量子論を発展→ **離散的なエネルギー準位の導入**
さまざまな特異な実験結果を説明

1925年:ハイゼンベルク

1926年:シュレディンガーとディラック

量子力学を定式化→前期量子論

物理量が**量子化**される(離散的な(とびとびの)値)

物理状態は**状態の存在確率**として評価される

場所と速度、時間とエネルギーは同時には決まらない(**不確定性原理**)

量子力学も特殊相対論も人間の生活空間では無視できる

量子力学の誕生

1927年: ディラック

行列力学と波動力学の変換理論

→ 同じ理論体系の(変換可能な)2つの記述法であることを証明

→ 「量子力学」と呼ばれる理論体系に発展

→ 行列から行列への変換係数 = 遷移確率

放射の放出と吸収の量子論(放射場の量子化) → QEDの創始

1927年: ハイゼンベルク

不確定性原理の論文発表

1927年: パウリ

スピンを取り入れた量子力学の構築

スピン演算子「パウリ行列(スピンマトリックス)」を導入

1927年: ボーア

相補性原理を発表 → 因果律の否定

1928年: トムソン - ガモフ

α 崩壊のトンネル効果による説明 → 確率解釈の実証

コラム:不確定性原理

量子力学の本来の性質

「物質粒子」の位置Qと運動量Pは測定する、しないに係わらず、同時に正確にきめることはできない

ケナードの不等式 ($\sigma(Q)$:位置のゆらぎ、 $\sigma(P)$:運動量のゆらぎ)
 $\sigma(Q) \cdot \sigma(P) \geq h/4\pi$ (h :プランク定数)

ハイゼンベルグの不確定性に関する主張(1927年)

「物質粒子」の位置Qと運動量Pを同時に正確に測定することはできない
不確定性関係式 (ΔQ :位置の誤差、 ΔP :運動量の誤差)

$\Delta Q \cdot \Delta P \geq h/4\pi$ (ΔQ 、 ΔP をゼロにすることはできない)

小澤の不等式(1988年)→実験により確認(2012年)

「ゆらぎ」と「誤差」についての混同を排除し、
「測定」や「誤差」について数学的に定義。

不確定性関係式

$\Delta Q \cdot \Delta P + \sigma(Q) \cdot \Delta P + \sigma(P) \cdot \Delta Q \geq h/4\pi$

(ΔQ 、 ΔP のどちらかだけをゼロにすることができる)

素粒子論(場の量子論):原子核物理、標準理論へ

1935-1936年:ボーア

原子核の液滴模型

核は原子のように離散的な準位を持つ→共鳴励起現象の存在

複合核模型

入射粒子の核内分配において多くの核の共鳴状態ができ、
複雑な過程の後ある核子が放出される

1936年:ブライト-ウィグナー(米)

核共鳴現象の定量化(中性子吸収の理論)→核断面積の導入

ウィグナーとノイマンは高校時代同級生

ウィグナーとディラックは義理の兄弟

1949年:マイヤー(シカゴ大)、イエンゼン(独)

核の殻構造論(殻模型)+魔法数

核子が特定の個数よりなる核が安定であることの説明

$j-j$ 結合殻模型:スピン-軌道相互作用

核子はペアを組んで対結合している

中性子と陽子とは別々に存在しているに近い

素粒子論(場の量子論):原子核物理、標準理論へ

原子模型と量子力学

技術的な応用を考える限りにおいては、
物質の構成要素と基本法則として十分に満足のものである

自然とは何かを常に問いかける哲学的な科学者たち:
まだまだ一里塚でしかない

場の量子論→科学的な物質観に、いくつかの根本的な修正を迫る

真空:場の量は僅かに振動(完全な「虚空」は存在しない)

アリストテレスの「自然は真空を嫌う」は、結果的に正当

物質と力の二元論の否定:物質粒子も電磁場も同じ形式の場の量で記述

場の量子論の展開→原子核物理の発展

統一理論へ

現在では、量子色力学+電磁弱統一理論

場の種類が多すぎ、重力相互作用が定式されていない

そして、「標準理論」へ

対称性:

回転対称性

並進対称性

ローレンツ対称性 → 時空は同一

ゲージ対称性 → 場の量子論(生成・消滅演算子)

非可換ゲージ対称性 → 光子以外は有限質量
(力の伝達粒子の質量がゼロの矛盾)

自発的な対称性の破れ → 質量

ゲージ粒子(勝手に増殖し、運動を容易にする)の質量と対称性の破れ
→ 動きにくさ=質量(ヒッグス粒子の予想)

万物の理論 (Theory of Everything)

$$L = \bar{\psi} i \vec{\partial} \psi - \bar{\psi} M \psi \quad \text{基本粒子 (e, } \nu \text{、クォーク (u, d))}$$

$$- g_1 \bar{\psi} \vec{B} \psi - \frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu} \quad \text{電磁気力 (e)}$$

$$- g_2 \bar{\psi} \vec{W} \psi - \frac{1}{4} W^{\mu\nu} W_{\mu\nu} \quad \text{弱い相互作用 (} \nu \text{)}$$

$$- g_3 \bar{\psi} \vec{G} \psi - \frac{1}{4} G^{\mu\nu} G_{\mu\nu} \quad \text{強い相互作用 (u, d)}$$

統一理論

大統一理論

$$+ \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \quad \text{ヒッグス粒子}$$

超大統一理論

超弦理論

粒子 = 輪ゴムのような弦 → 有限の大きさ

重力理論(一般相対性理論):「空間のゆがみ=質量+エネルギー」

ブラックホールの底(特異点)→無限大の矛盾=ビッグバン

粒子は点である($1/r=\infty$)

次元(10次元)の矛盾 → 4次元宇宙、残りの6次元はどこへ?

綱渡り:人間には1次元、虫には2次元(面)に見える

より小さい世界を見れば、隠れた次元が見える

ホーキングのパラドックス:ブラックホールの底で発生するなぞの熱
動けないところでなぜ熱が発生する?

たくさんの弦が集合し、結合して膜になる

→2次元が存在し、2次元中の移動が**ブラックホールの熱を解決**

超弦理論の検証

→**重力波**の検出(ブラックホールの入口の直接観測)

→異次元の把握(超マイクロ世界の探索)

宇宙の始まり:われわれはなぜ生まれてきたのか？

「より哲学的な問いかけ」がこれからも続く

答えが分からないのも悲しい

わかってしまうのも悲しい

探求を続けることが何よりすばらしい

工学では？

→保守的な推定からBest Estimate & Uncertaintyへ

(例:放射能未検出の深さ)

→どこか物理的

原子力開発の歴史

原子核変換と核エネルギーの利用

1907年:ラザフォード

放射性元素の崩壊系列の分類

Th系列 ($N=4n$)、U-Ra系列 ($N=4n+2$)、Ac系列 ($N=4n+3$)

$N=4n+1$ 系列:人工元素のNp系列として1940年に発見

1908年:ガイガー(独、ラザフォードの弟子)

ガイガー計数管の発明

1928年:GM計数管、比例計数管の開発

1913年:ソディー(英)

同位体の概念を提唱:ギリシア語、イソス(同じ)+トプス(位置)

1915年:ハーキンス

He原子核の質量が水素の4倍でないことを発見→莫大なエネルギー

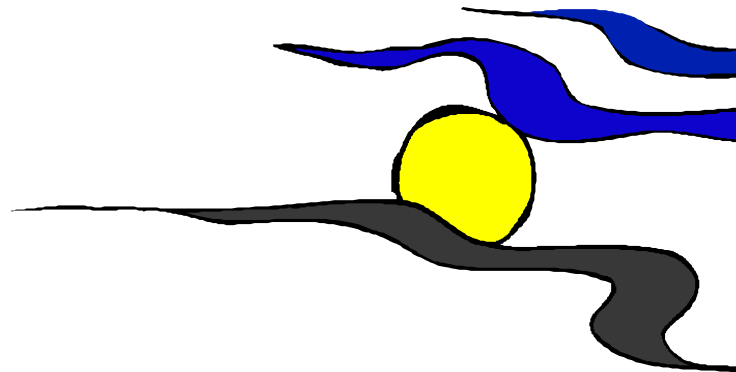
1917年:オットー・ハーン・リーゼ・マイトナー

91番目の元素, プロトアクチニウム(Pa)発見

1919年:ラザフォード

最初に人工原子核変換を実行: $N + \alpha \rightarrow O + p$

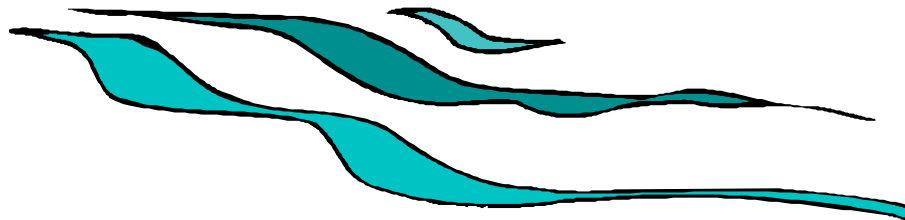
コラム:ラザフォードは核エネルギーの利用が現実的でないと考えていた？



1933年の講演:

(原子変換のような)現象が起きる確率は低く、
エネルギー生産の手段としては非常に効率が悪い。
だから、原子変換によってエネルギーを手に入れようとするのは、
月影について語るようなものである。

(タイムズの記事による)



原子核変換と核エネルギーの利用

1925年: アストン

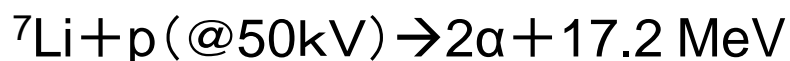
質量欠損(原子核の質量数が微妙に整数からずれていること)**を発見**
→ **結合エネルギー**

1931年: ユーリー(米)

重水素の発見

1932年: コックロフトーウォルトン(ラザフォードの弟子)

加速器による最初の人工原子核反応に成功



(α 粒子の運動エネルギー、当時 14.3 ± 2.7)

この質量損失は、 $E=mc^2$ を証明

1932年: チャドウィック(英)

中性子の発見: ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{n}$

ラザフォードは最初から中性子を予測して、チャドウィックらを指導

中性子の発見は同位体をうまく説明



チャドウィック

コラム：中性子発見物語

1928年：ワルター・ボーデ（独、プランクの弟子）とハンス・ベッカー
ポロニウム崩壊 α 線 \rightarrow Be：透過性の強い放射線を発見（Be線）

キュリー・ジョリオ夫妻は中性粒子を光子（ γ 線のコンプトン効果）と考えた

夫妻の論文を読んで

ラザフォード「そんなことは信じられん（ γ 線では絶対ない）」

マヨローナ「間抜けだ、二人は中性の陽子を発見したのに、
それに気づいていない！」

チャドウィックが新粒子と見出す

ラザフォードの影響下にあったチャドウィックは当然中性粒子と想定
「中性子（neutron）」と命名

ラザフォード（ノーベル賞選考で、ジョリオ夫妻も貢献したという意見に対して）
「中性子についてはチャドウィックだ。」

ジョリオたちは切れ者だから大丈夫、
近いうちに何か他のことでもらうよ」

コラム:2度の失敗にめげず・・・！？

マリー・キュリーの娘イレーヌ・キュリーと夫フレデリック・ジョリオ

1932年:Be線を陽子と衝突させると大運動量遷移が起きることを発見

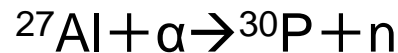
中性子の発見にあと一步のところまで迫りながら、最後の解釈を誤る

→中性子による現象をγ線に起因するものと解釈した

1934年:核分裂の発見にあと一步のところまで迫って、再び失敗する

だが、原子核について天才的な洞察力を持つければ、

ただちに新しい実験を開始し、人工放射性物質の生成を成功



→人工的な原子変換を化学的手法で検出することに成功

→リン(P)が放射性物質だった(陽電子放出を伴う崩壊の最初の例)

→1935年にノーベル化学賞(ラザフォードの予言が的中)

核エネルギーを人工的に外部に取り出すことに成功したものと解釈できる

ノーベル賞の受賞講演:ジョリオ

「元素を意のままに合成したり分割したりする技術を手にした科学者たちは、爆発物のような物質を作り出す可能性についても考えさせられるようになった。もし、こうした物質変換が、物質中を拡散するようにして伝わるが起こるならば、膨大なエネルギーを取り出すことも考えられる」

原子核変換と核エネルギーの利用

1934年:フェルミ(当時ローマ大)

ウラン以上の原子番号の元素を作成:**「超ウラン元素」と命名**

実は、核分裂

パラフィンを通った遅い中性子の方が核反応に有効であることを発見

1937年:E.G.セグレ(伊)

最初の人工元素の製作:Tc(原子番号43、未発見の最も軽い元素)

1938年:オットー・ハーン(独)

核分裂の発見→ $E=mc^2$ より、**大量のエネルギーを放出する可能性**

1939年:フランスのジョリオ・キュリーのグループ

中性子でウランの核分裂

→**新たに複数の中性子が放出される事実を発見**

→**連鎖反応の可能性**

エネルギーを連続的に取り出す**装置(原子炉)の概念**→**特許申請**

フランスの栄光をかけたこの特許:

→最初に原子炉の開発に成功した**アメリカが無視**

→**日本でも認められなかった(1969年最高裁での上告が棄却)**

コラム：核分裂の発見と科学者の反応

核分裂の発見

中性子を減速するとウランと相互作用しやすくなるという大発見

ウランは自然界に存在する最も重い元素として知られていた(当時)

→ウラン+中性子→より重い原子核ができるとの期待

超ウラン元素と思われたものはあまりに多様な性質を示した

どうしてもバリウム(ウランの半分以下の大きさ)と区別できなかった

核分裂の命名

細胞分裂(fission)→核分裂

細胞の核(nucleus)→原子核

1939年：アメリカで開かれていた国際物理学会で報告

核分裂その反応から莫大なエネルギーが発生することを知った

仁科芳雄を中心とする理研原子核物理研究グループが追認

京都大学の荒勝文策教授のグループ

核分裂によって新たに生じる中性子の数を2.6と測定(JENDL-3.3:2.44)

この中性子数は連鎖反応に重要な意味を持つ

コラム：核分裂の発見と科学者の反応(2)

1939年：ジラード(ハンガリー)

ウランの核分裂の際に中性子が放出されていることを最初に確認
ウランは、質量数の小さい原子核に比べて、中性子を高い割合で含む
→最初に連鎖的な核反応の可能性を思いついた
→途轍もなく巨大なエネルギーの放出
減速材として黒鉛が適当であることを見いだしていた

彼は科学の社会的役割について最も真剣に考えていた科学者であった
原子核研究は完全にオープンにすべきではないと主張
軍事研究の公開が自国の国益を損なう可能性がある→発表を制限
こうした制限を科学者の側が自主的に行うべきだと考えた
必ずしも他の科学者たちの賛同を得るには到らなかった

結局

アメリカ政府が軍事目的の核開発(「マンハッタン計画」)を推進し始める
→政策的に研究内容が機密扱いされるようになった

原子核変換と核エネルギーの利用

1940-41年: マクミラン、シーボーグ(米)

ウランへの中性子照射による超ウラン元素の発見(製造)

${}_{93}\text{Np}$ (ネプツニウム)、同位体は後に自然界でも発見

天王星(ウラヌス)の外側の海王星(ネプチューン)より命名

1941年: シーボーグ(カリフォルニア大学)

ウランの核反応から周期律表でいう94番目の新しい元素を発見

太陽系の一番外側を回る冥王星(プルトー)にちなんで命名

${}^{239}\text{Pu}$ の原子核は ${}^{235}\text{U}$ よりはるかに容易に核分裂を起こすことを確認

不幸にもプルトニウムは、極秘の原子爆弾開発計画の主演として登場

シーボーグ:

「プルトニウムの歴史を顧みるとき、これほど短い期間に、

これほど多くの国々の、これほど多くの人々から、これほど執拗な

注目を浴びた元素は、他にはないと私は思う」

コラム：以後の超ウラン元素発見の系譜

- 1944年： ${}_{96}\text{Cm}$ (キュリウム) ←シーボーグ (Pu + α)
- 1945年： ${}_{95}\text{Am}$ (アメリシウム) ←シーボーグ (Pu + n)
- 1950年： ${}_{97}\text{Bk}$ (バークリウム) ←シーボーグ (Am + α)
- 1950年： ${}_{98}\text{Cf}$ (カリフォルニウム) ←シーボーグ (Cm + α)
- 1952年： ${}_{99}\text{Es}$ (アインシュタインウム) ←ギオルソ、シーボーグ (核実験)
- 1952年： ${}_{100}\text{Fm}$ (フェルミウム) ←ギオルソ、シーボーグ (核実験)
- 1955年： ${}_{101}\text{Md}$ (メンデレビウム) ←シーボーグ (Es + α)
- 1961年： ${}_{103}\text{Lr}$ (ローレンシウム) ←ギオルソ (Cf + B)
- 1963年頃： ${}_{102}\text{No}$ (ノーベリウム) ←フレロフ (Cm + C)
- これ以後は、寿命が短く、旧ソ連で主に研究された。

コラム：原子爆弾の予言

核エネルギーは人類の手の届くところにあることが、多くの科学者に認識される

質量分析器の発明者であるアストンの1936年に行った予言的な講演

「研究を法律で禁止すべきだと主張する者もいる。

すでに人間の破壊力は十分すぎるというのだ。

だが、われわれの祖先に当たる最も猿に近い有史以前の人類も、
食物を料理することに反対し、新たに見つけた道具や火を
使用するのには危険だと言ったことだろう。

私個人の見解では、原子内部のエネルギーは身近なものになり、
そしていつの日か人類はほとんど無限といえるその力を解放し、
かつコントロールするようになるだろう。

われわれは、こうした流れを阻止できない。

ただ隣人を吹き飛ばすようなまねを絶対にしないようにと願うだけだ」。

1939年にボーアも同様に「原子爆弾の可能性」について講演

原子爆弾の開発

1940年: エーベルソン(米)

UF₆(六フッ化ウラン)の気体拡散法による²³⁵Uの濃縮法開発

1941年: 仁科芳雄や長岡半太郎たち

原爆の可能性に気づく→陸軍は理研に「原爆の研究」を委託

→原爆製造に必要な濃縮ウランを作り出せなかった

1942年: 米国陸軍、原爆計画(マンハッタン計画)開始

1945年7月16日5:30: ニューメキシコ州のアラモゴードで世界初の核爆弾

1945年8月: 広島(ウラニウム型)と長崎(プルトニウム型)に原爆が投下

1952年11月1日: 初の水素爆弾の実験に成功(10Mt)

1954年3月1日: マーシャル諸島ビキニ環礁で水爆実験

ソ連(1949年)、イギリス(1952年)、フランス(1960年)、中国(1964年)

相次いで原爆実験成功

1974年: インド、核実験実施

1997年: インド、パキスタン、地下核兵器実験

原子炉の歴史

1941年: エンリコ・フェルミのグループ

コロンビア大学で連鎖反応に至る過程の実験: 黒鉛とウランのブロック
小型の未臨界実験装置

(天井がもう少し高かったら、最初の原子炉が実現したかも知れない)

1942年12月2日: フェルミが率いたチーム

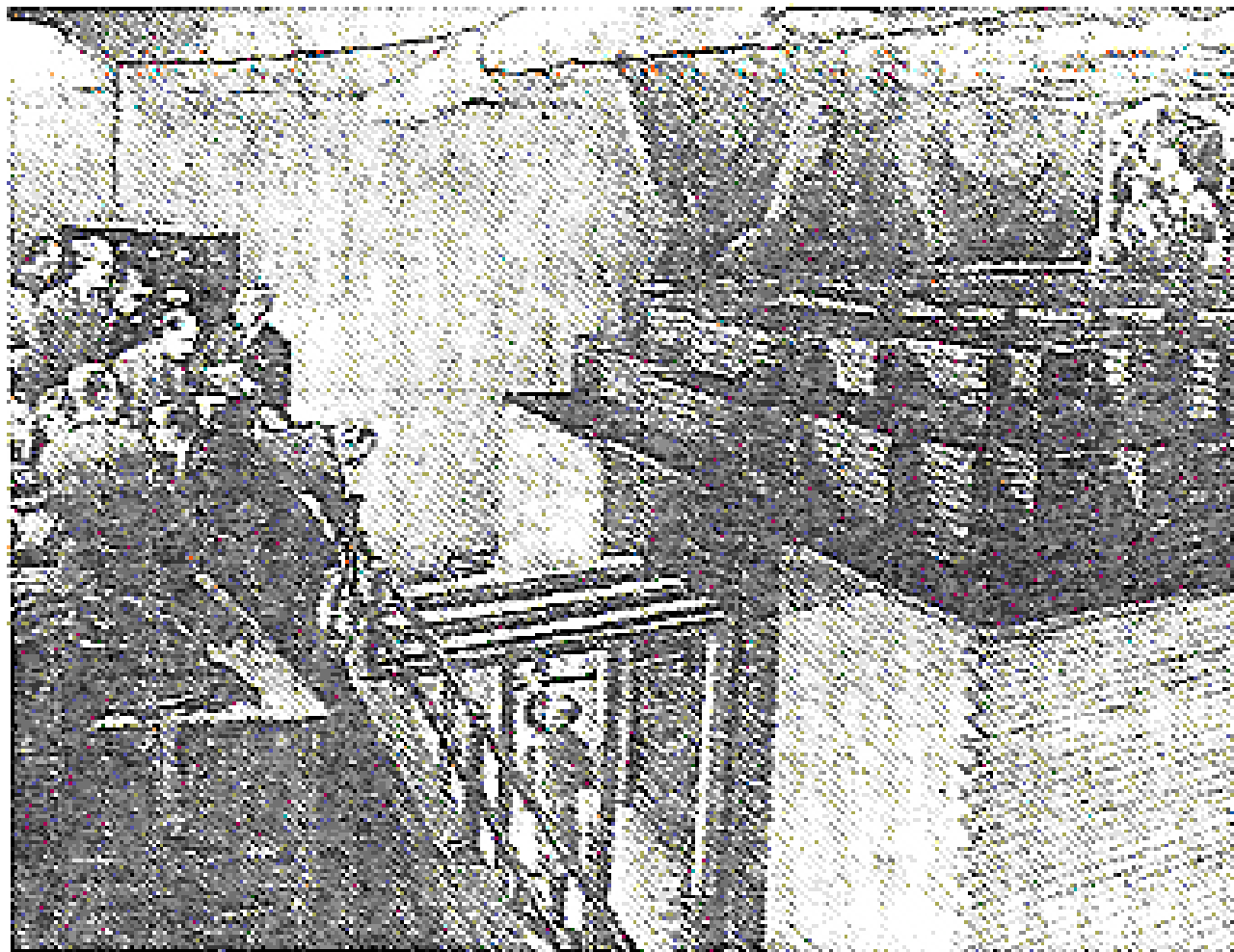
シカゴ大学の敷地に建設された実験的な原子炉「ウラン・パイル(CP-1)」
(暗号名「冶金研究所」)

最初的人工的な核分裂連鎖反応を達成

連鎖反応を制御: すでに中性子を吸収する制御棒が存在

この施設はプルトニウム製造にも使われ、
高速増殖炉の基本原理ともなった

コラム:フェルミら世界初の原子炉実験に成功(1942年)



Chicago Pile-1

最初の臨界
(連鎖反応が
持続する状態)
時の出力=
0.5W

コラム：実験成功の報はワシントンへ

電話の暗号：

「たった今、イタリア人の航海士が新大陸に上陸した。
地球は彼らが考えていたほど大きくなかったので、
予定より早く新世界へ到達した。」

「原住民は友好的だったか？」

「上陸した一同、安全で、そして喜んでいる。」

コロンブスのアメリカ新大陸発見の450周年

イタリア人のコロンブスとフェルミ2人ともその時、同じ41歳

原子力開発の歴史

原子炉の歴史

1944年5月: 米国ANL

世界最初の重水減速炉CP-3(研究用)が臨界

1946年: アメリカの原子力委員会発足

原子力開発計画を転換: 平和時のそれに再編成

ソ連(1946年12月)、英国(1947年8月)、フランス(1948年12月)

それぞれ研究用原子炉が初臨界

1947年頃: 米原子力委員会と国立研究所

「原子の爐(パイル)」→「原子炉(リアクター)」という語が定着

総合的な原子炉開発計画を立案: 平時の限られた予算の問題

オークリッジの原子炉開発グループ

動力炉の早期実用化: 水冷却炉に着目

→慣れ親しんできた水(蒸気)を主体に考えるのが近道

当時の解析能力:

原子炉内の高温部で水が沸騰して気泡(ボイド)が生じる

→中性子のふるまいが乱れ、核反応が不安定

→安定な運転は無理

A.ワインバーグ: 加圧水型炉を立案(圧力をかけて冷却水を沸騰させない)

原子力開発の歴史

原子炉の歴史

1949年:ハイマン・リコバー(海軍技術将校、大佐)

原子力潜水艦のアイデア→発電用原子炉に発展

加圧水型動力用原子炉(PWR)の開発を進めるという体制が整った

1951年12月20日:世界で最初の高速増殖実験炉(EBR-1)による

原子力によるはじめての発電→100kWの発電(電球が点灯)

1953年3月:WH社

PWR原型第1号機の臨界→96時間の連続運転を記録

現在の原子力発電所の加圧水型原子炉型炉(PWR)の原点

1953年:アイゼンハワー米大統領

国連総会での画期的な演説:

「平和のための原子力(Atoms for Peace)」

原子力開発の歴史

原子炉の歴史

1954年: ソ連オブニスク原子力発電所運転開始(5000kW)

1954年: 英国コールダーホール原子力発電所60000kWの発電成功

1955年: 世界初の原子力潜水艦「ノーチラス号」(米国)就航

1957年: 国際原子力機関(IAEA)発足

1957年: 初の商用発電炉PWR型の SHIPPINGポート発電所(90000kW、米国)

1962年: カナダ初の発電炉(CANDU、重水炉)が臨界

1962年: 原子力商船「サバンナ号」(米国)処女航海

1963年: 高速増殖型エンリコ・フェルミ原子力発電所完成(米国)

1973年: ソ連、高速増殖炉BN-350運転開始

1973年: 仏、高速増殖原型炉フェニックスが臨界

1979年: 米国スリーマイル・アイランド(TMI)事故

冷却水の大量漏洩による放射能の外部放出→原子力神話の崩壊

多重防護方式の妥当性が実証

1985年: 仏、高速増殖実証炉スーパーフェニックスが臨界

1986年: ソ連チェルノブイリ原子力発電所4号機で事故が発生

大量の放射性物質が大気中に放出

2011年: 東京電力福島第1原子力発電所での炉心溶融

大量の放射性物質が大気中に放出、東北大震災による津波が引き金

原子力開発の歴史

日本の原子力研究

1947年: 極東委員会、日本の原子力研究の禁止を決議

1952年: 講和条約発効(独立の回復)→原子力開発に着手

1953年: 科学研究所(現理化学研究所)、サイクロトロンによるRIの生産を開始

1954年: 内閣に原子力利用準備調査会(原子力委員会の前身)が設置

1956年: 原子力3法制定・施行

原子力基本法、原子力委員会設置法、総理府設置法の一部改正法

平和目的に限定→民主、自主、公開の3原則

1956年: 科学技術庁設立、日本原子力研究所(原研)、原子燃料公社発足

1957年: 日本原子力発電(株、原電)を設立

1957年: 原研、日本第1号原子炉ウォーターボイラー型炉(JRR-1)臨界

1959年: 原子燃料公社、国産1号炉用金属ウラン300kgを試作

1959年: 神戸製鋼、原子炉用ジルコニウム合金の国産化

1962年: 原研、国産1号炉(JRR-3)臨界

1963年: 原研、動力試験炉JPDRが臨界(GE社製小型BWR、12500kW)

10月26日にわが国初の発電に成功→「原子力の日」

1963年: 原研、シグマ委員会発足

原子力開発の歴史

日本の原子力研究

- 1964年:京大炉が全国共同利用研として完成・臨界(5 MW)
- 1965年:原電東海発電所臨界(初の送電に成功:定格電気出力16万6000kW)
- 1967年:動力炉・核燃料開発事業団が発足
- 1968年:原研、核データ研究室(核データセンターの前身、改称は1977年)設置
- 1969年:動燃、遠心分離法による濃縮実験に成功
- 1974年:原子力船「むつ」の放射線漏れ事件(中性子線ストリーミングが原因)
- 1976年:核不拡散条約批准(97番目の加盟国→不平等性のため遅れた)
- 1976年:原子力安全委員会設置(開発と規制の役割を分離)
- 1977年:動燃、高速増殖実験炉「常陽」臨界(世界で5か国目)
- 1978年:原電、新型転換炉「ふげん」の100%出力達成
- 1978年:わが国の原子力発電規模は1000万kWの大台を突破
水力による発電量を上回った
東海2号炉はわが国で初めての100万kWを超える原子炉
- 1987年:原研、JT-60が臨界プラズマ条件を達成

原子力開発の歴史

日本の原子力研究

1991年: 関西電力美浜2号機で蒸気発生器伝熱管の破断事故

非常用炉心冷却装置(ECCS)が働くわが国初めての事故

1993年: 多目的高温ガス実験炉HTTRが初臨界

1994年: 動燃、高速増殖原型炉「もんじゅ」臨界

1995年: 動燃、「もんじゅ」で、2次ナトリウム(Na)冷却系でNa漏洩事故が発生

1998年: 原電、東海発電所1号機(GCR)の営業運転を停止

軽水炉に比べて発電コストが割高という経済性が最大の理由

1997年: 動燃、「核燃料サイクル開発機構」としてスタート

1999年: 核燃料加工会社ジェー・シー・オー(JCO)東海事業所で臨界事故が発生

現場作業員2名が死亡

日本が原子力平和利用に着手して初めての犠牲者を伴う事故

2005年: 日本原子力研究開発機構が発足

2011年: 東京電力福島第一発電所で炉心溶融というSA事故が発生

周辺住民20万人弱が長期にわたって避難

日本で初めてのINES=7の事故