

未来を切り拓く超電導先端技術

柁川, 一弘
九州大学大学院システム情報科学研究院 電気システム工学部門 : 准教授

<https://hdl.handle.net/2324/1937145>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学府・研究院先端サマーセミナー. 2018, 2018-08-10
バージョン :
権利関係 :



未来を切り拓く超伝導先端技術

柁川 一弘（電気電子工学専攻）



KYUSHU UNIVERSITY



KYUSHU UNIVERSITY

1

講演内容

- ◆ 超伝導現象の基礎
- ◆ 応用例
 - 1) 超電導リニア
 - 2) 核磁気共鳴装置
 - 3) 粒子加速器
 - 4) 核融合炉

講演内容

- ◆ 超伝導現象の基礎
- ◆ 応用例
 - 1) 超電導リニア
 - 2) 核磁気共鳴装置
 - 3) 粒子加速器
 - 4) 核融合炉

「超伝導」と「超電導」

- ◆ 英語「superconductivity」の和訳
 - 「super」→ 超
 - 「conductivity」→ (電気)伝導
- ◆ 「超伝導」
 - 基礎研究・物理学・文部科学省
- ◆ 「超電導」
 - 応用研究・電気工学・経済産業省
- ◆ 中国語「超导」
- ◆ 「field」→ 場(電磁場)・界(電磁界)

超伝導現象の発見と物理的理解

- ◆【1913年ノーベル物理学賞】ヘイケ・カメリン・オネスが低温物性研究に貢献(1908年のヘリウムの液化と1911年の超伝導現象の発見)。
- ◆ マイスナー(-オクセンフェルト)効果をヴァルター・マイスナーとローベルト・オクセンフェルトが1933年に発見。
- ◆【1972年ノーベル物理学賞】ジョン・バーディーン、レオン・クーパー、ジョン・ロバート・シュリーファーが超伝導発現機構に関するBCS理論を1957年に発表。
 - バーディーンはノーベル物理学賞を2度受賞した唯一の人物。1956年にトランジスタの発明でも受賞。
- ◆【2003年ノーベル物理学賞】アレクセイ・アブリコソフが第2種超伝導体の渦糸理論を1957年に発表。

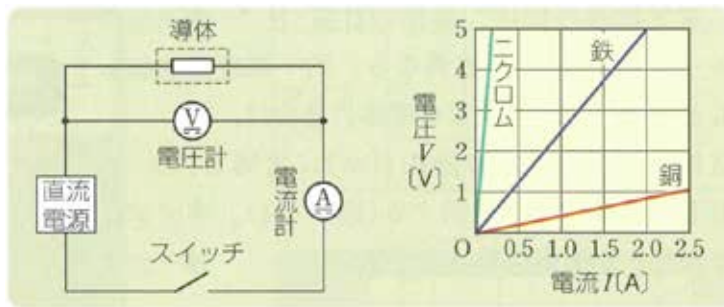
Wikipedia

超伝導現象の発見と物理的理解

- ◆【1913年ノーベル物理学賞】ヘイケ・カメリン・オネスが低温物性研究に貢献(1908年のヘリウムの液化と1911年の超伝導現象の発見)。
- ◆ マイスナー(-オクセンフェルト)効果をヴァルター・マイスナーとローベルト・オクセンフェルトが1933年に発見。
- ◆【1972年ノーベル物理学賞】ジョン・バーディーン、レオン・クーパー、ジョン・ロバート・シュリーファーが超伝導発現機構に関するBCS理論を1957年に発表。
 - バーディーンはノーベル物理学賞を2度受賞した唯一の人物。1956年にトランジスタの発明でも受賞。
- ◆【2003年ノーベル物理学賞】アレクセイ・アブリコソフが第2種超伝導体の渦糸理論を1957年に発表。

Wikipedia

電気抵抗とジュール熱



▲図 2-39 電流と電圧の関係

重要 2-5

オームの法則

$$I = \frac{V}{R}$$

$$V = RI$$

(2・41)

重要 2-6

電力と電力量

電力 $P = IV$

(2・47)

電力量 $W = Pt = IVt$

(2・48)

電圧 V

電流 I

抵抗 R

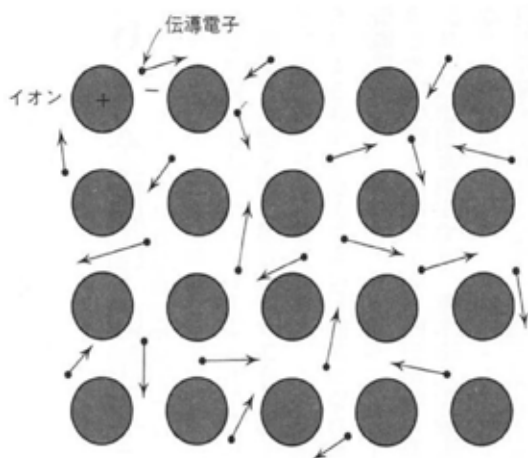
時間 t

$$W = I^2 R t$$

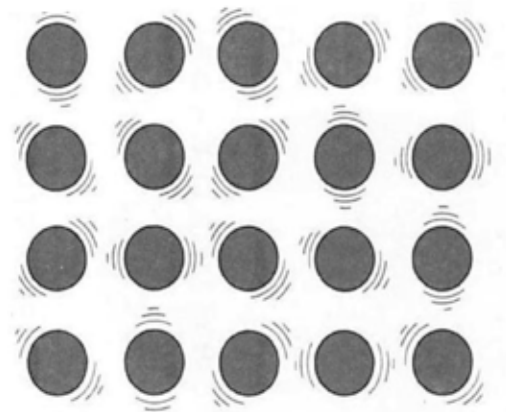
「チャート式 新物理II」(2005)

電気抵抗の発生機構

金属中の伝導電子

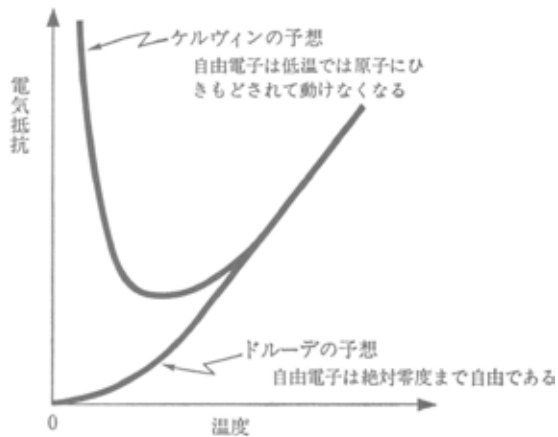


正イオンの熱振動

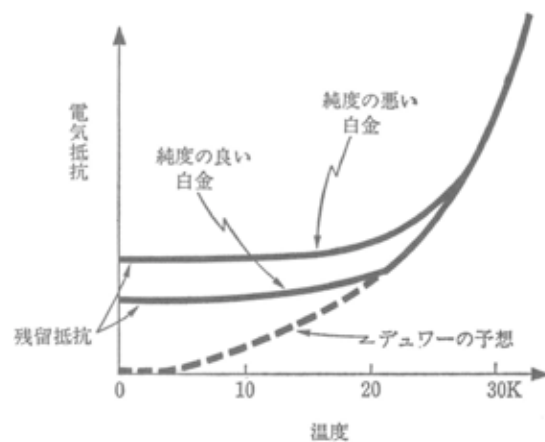


金属を冷やすと電気抵抗はどうなる？

電気抵抗の予測



2.5 温度低下にともなう電気抵抗の変化に関するケルヴィンの予想とドルーデの予想。



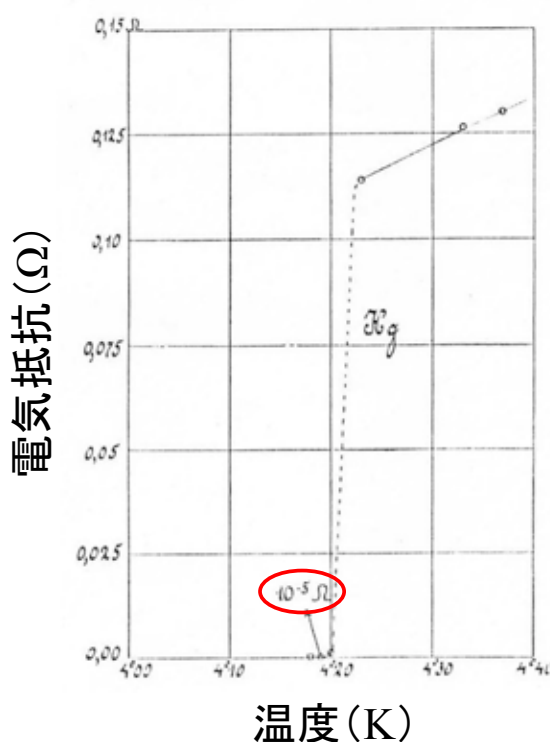
2.6 白金の電気抵抗の測定値とデュワールの予想（絶対零度にならない前に抵抗はゼロになってしまう）。

ケルヴィン卿 (1824～1907)
 パウル・ドルーデ (1863～1906)

ジェイムズ・デュワー
 (1842～1923)

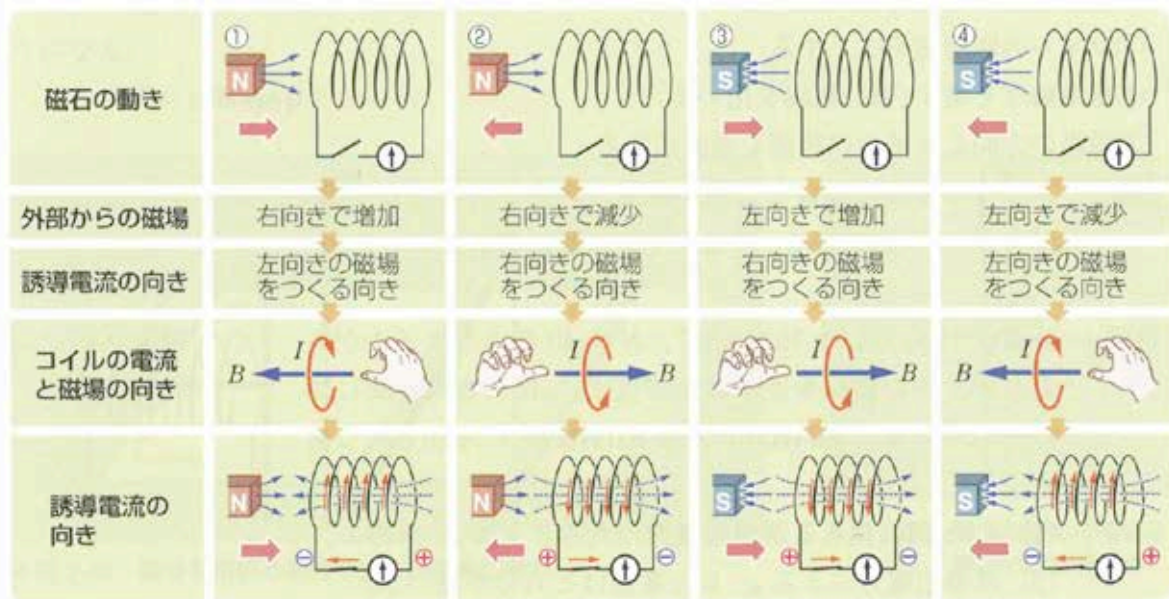
ブルーバックス「超伝導の世界」

水銀 (Hg) の電気抵抗測定 (1911年)



ヘイケ・カメリン・オネス
 (1853～1926)

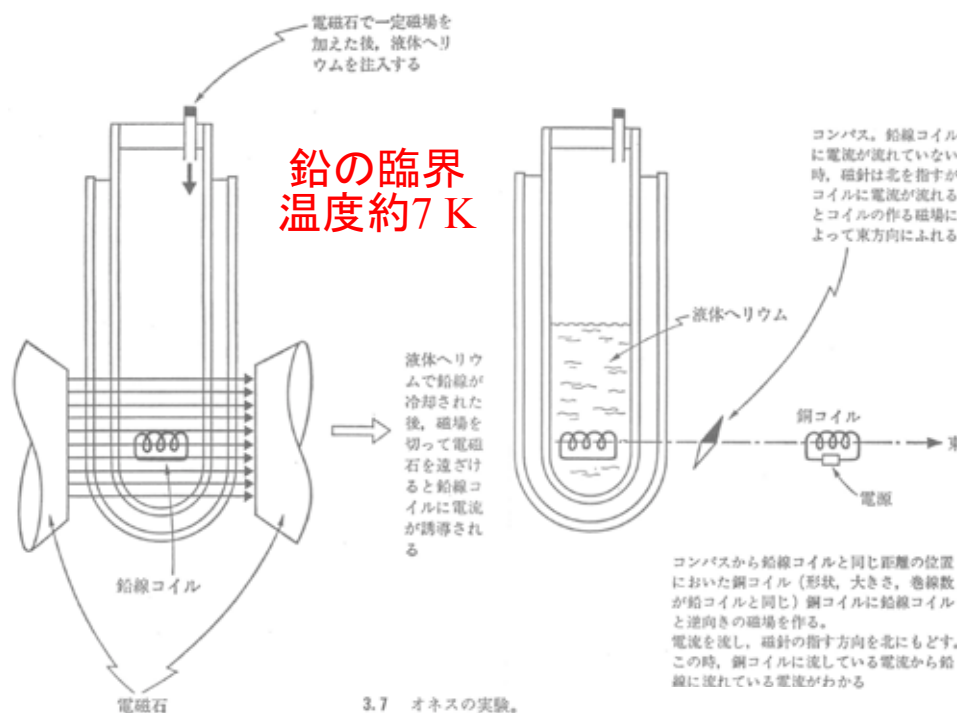
ファラデーの電磁誘導の法則



▲図 2-84 コイル内の磁場の変化と誘導電流

「チャート式 新物理II」(2005)

電気抵抗は本当にゼロか？（誘導電流の減衰）



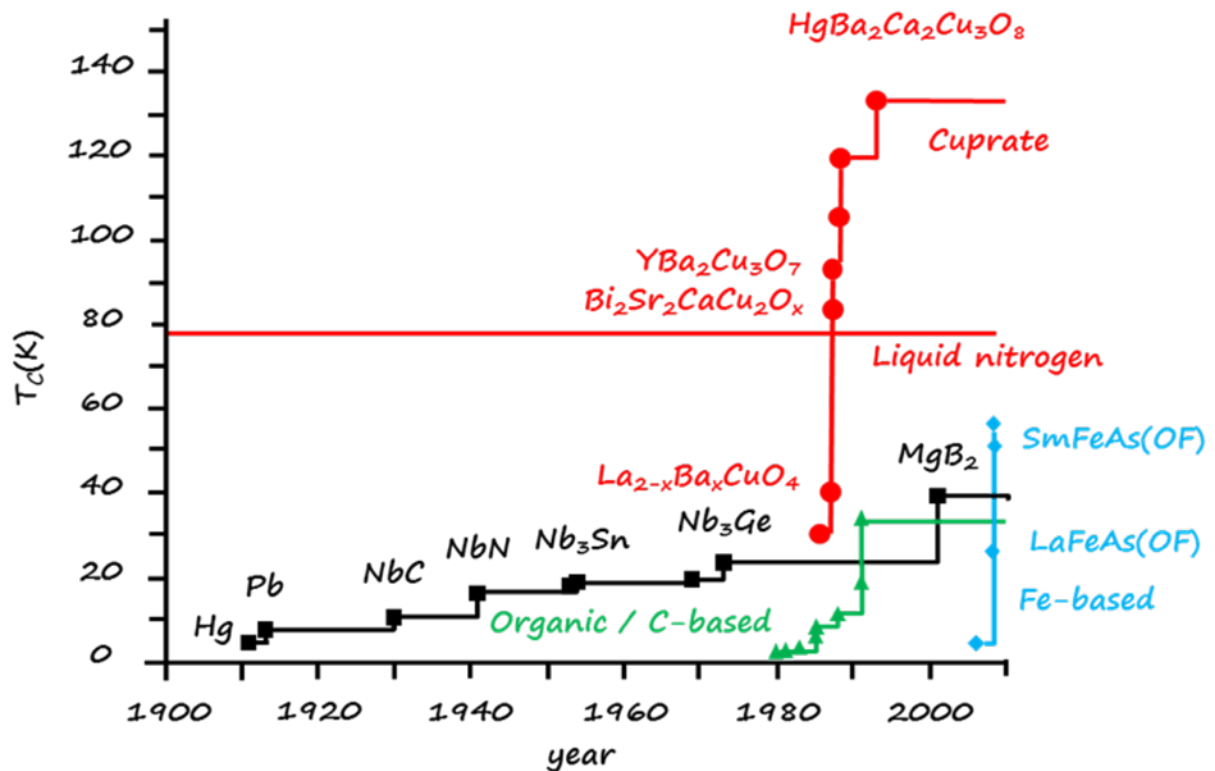
3.7 オネスの実験。

室温では
 10^{-5} 秒で
減衰

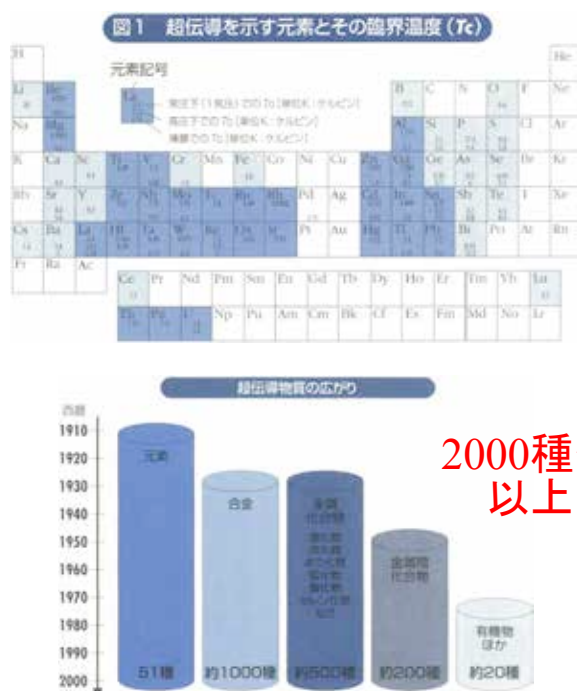
室温の
抵抗の
 10^{-11} 以下

ブルーボックス「超伝導の世界」

臨界温度 T_c の高い超伝導体発見の歴史



色々な超伝導体



2000種類以上

電氣的・磁氣的性質 物 59 (405)

超伝導体
超伝導物質の臨界温度と臨界磁場

物質	臨界温度 T_c /K	臨界磁場 ¹⁾ H_c /Oe	物質	臨界温度 T_c /K	臨界磁場 ¹⁾ H_c /Oe	物質	臨界温度 T_c /K	臨界磁場 ¹⁾ H_c /Oe
単 体			化 合 物			酸 化 物		
Al	1.196	99	MgB ₂	39		Mo ₆ Tc ₄	12.0	
Cd	0.56	30	Nb ₃ Al	18.8	3.20×10^4 (4.2K)	PbCoGa ₄	18.5	7.40×10^4
Ga	1.091	51	Nb ₃ Au	11.5		(La _{1-x} Bi _x) ₂ Y	38 ^{*)}	3 ^{*)}
Ga (β)	6.2	—	Nb ₃ Ge	~18		YBa ₂ Cu ₃ O ₇	90~95 ^{*)}	3 ^{*)}
Ga (γ)	7.62	—	Nb ₃ Sn	18.3	2.45×10^4 (4.2K)	Bi ₂ Y ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110 ^{*)}	3 ^{*)}
Hf	0.165	—	Nb ₃ Al _{0.85}	21.05	4.2×10^4 (4.2K)	Bi ₂ Y ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	160 (高圧下)	3 ^{*)}
Hg (α)	4.154	411	V ₃ Si	16.5	2.08×10^4	La ₂ Fe ₁₄ Ni ₁₂	8	3 ^{*)}
Hg (β)	3.949	339	V ₃ Se	17.1	2.35×10^4	Li ₂ Fe ₂ As ₂	8	3 ^{*)}
In	3.4035	293	NbTi ₃	10.5		有機化合物		
Ir	0.140	19	Ta ₃ Zr	9.7		(TMDSF) ₂	1.4 ^{*)}	2.1×10^4
La (α)	4.9	—	HfN	6.2		CO ₂	1.5 ^{*)}	$0.5K$ ^{*)}
La (β)	6.06	1600	NbC	6.0		β-(BEDT-TTF) ₂ I ₂	8.1 ^{*)}	$0.6K$ ^{*)}
Mo	0.92	98	NbN _{0.85}	15.72	1.8×10^4	α-(BEDT-TTF) ₂ Cl ₂	10.4 ^{*)}	1.0×10^4
Nb	9.23	1980	C ₆₀	4.86		(TTF) ₂ Cl ₂	1.9 ^{*)}	2.7×10^4
Os	0.655	65	ZrN	8.90		(TTF) ₂ Cl ₂	1.0	$0.5K$ ^{*)}
Pa	1.4	—	Nb ₃ Sn	18.3		DMT-TTF ₂	3.5 ^{*)}	—
Pb	7.193	803	CoSi ₂	1.22		(TTF) ₂ Cl ₂	6	—
Re	1.699	198	PbTe ₂	1.53		その他		
Ru	0.49	66	HfO ₂	2.69		GeTe	0.30 ($\alpha=1.5 \times 10^{21}$) ^{*)}	—
Sn	3.722	305.5	YO ₂	4.7		SnTe	0.21 ($\alpha=2 \times 10^{21}$) ^{*)}	—
Ta	4.39	780	CoZr ₂	6.30		SrTiO ₃	0.38 ($\alpha=1 \times 10^{20}$) ^{*)}	—
Tc	7.92	1410	ZrV ₂	8.8	2.1×10^4 (4.2K)	Ga ₂ As ₂ O ₈	3.1	—
Th	1.368	162	AuPb ₃	4.42		Ga ₂ As ₂ O ₈	3.1	—
Ti	0.39	100	FeU ₂	3.86		CaK	0.39	—
Ti (α)	2.39	171	InLa ₃	10.40		CaK ₂	19.3	2.6×10^4
U (α)	0.68	~300	MoN	12.0		CaRb ₂	33	—
V	5.3	1020	合 金 ³⁾			Ga ₂ As ₂ O ₈	29.6	—
W	0.012	1.07	Pb _{1-x} Sn _x	3.39-7.26		Ca ₂ As ₂	8.4	—
Zn	0.852	53	Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 9.1 \times 10^4$ (4.2K)	Ca ₂ As ₂	7	—
Zr	0.546	47	Nb ₃ Zr ₁₀	10.8	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Sn	18.3	$\sim 1.2 \times 10^4$ (4.2K)			
			Nb ₃ Al	18.8	9.5×10^4 (4.2K)			
			Nb ₃ Ge	18.3	8.8×10^4 (4.2K)			

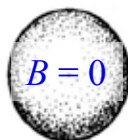
超伝導現象の発見と物理的理解

- ◆【1913年ノーベル物理学賞】ヘイケ・カメリン・オネスが低温物性研究に貢献(1908年のヘリウムの液化と1911年の超伝導現象の発見)。
- ◆マイスナー(-オクセンフェルト)効果をヴァルター・マイスナーとローベルト・オクセンフェルトが1933年に発見。
- ◆【1972年ノーベル物理学賞】ジョン・バーディーン、レオン・クーパー、ジョン・ロバート・シュリーファーが超伝導発現機構に関するBCS理論を1957年に発表。
 - バーディーンはノーベル物理学賞を2度受賞した唯一の人物。1956年にトランジスタの発明でも受賞。
- ◆【2003年ノーベル物理学賞】アレクセイ・アブリコソフが第2種超伝導体の渦糸理論を1957年に発表。

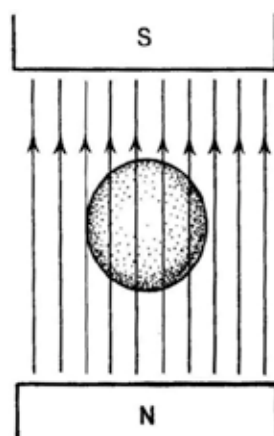
Wikipedia

「完全導体」と「超伝導体」

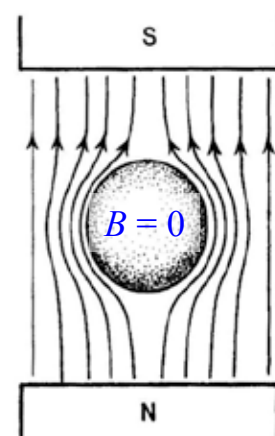
完全反磁性体
(マイスナー効果)



(a) 外部磁場なし



(b) 通常導体 ($R > 0$)



(c) 磁束線の排除

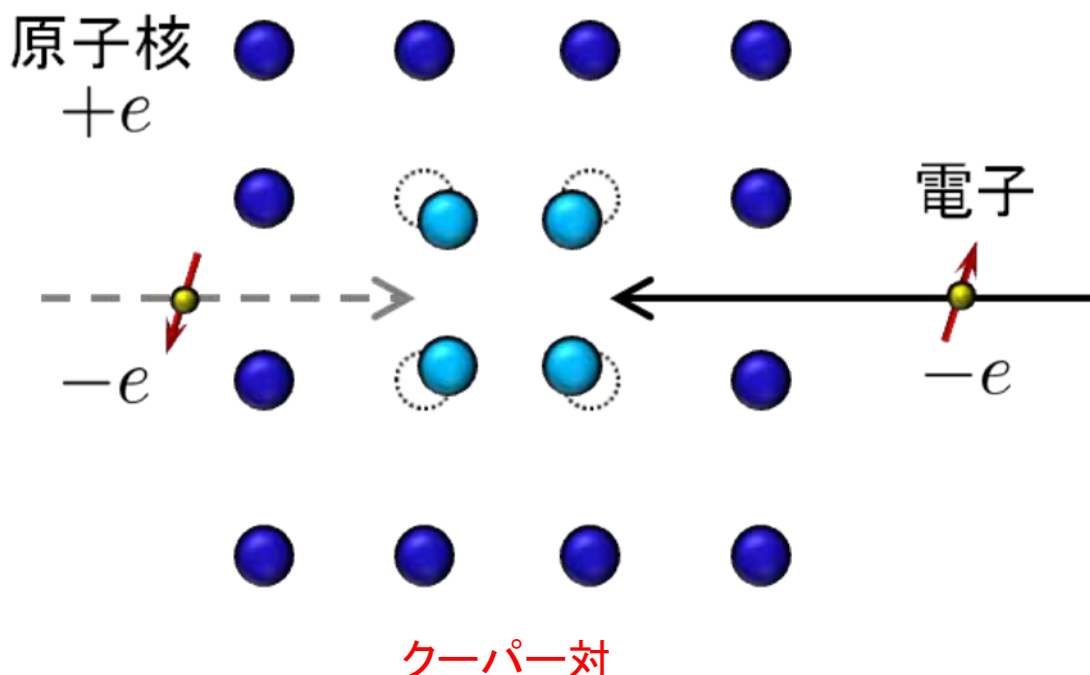
操 作	完全導体 ($R = 0$)	超伝導体
冷却後に外部磁場印加	(a) $\rightarrow$ (c)	(a) $\rightarrow$ (c)
外部磁場印加後に冷却	(b) $\rightarrow$ (b)	(b) $\rightarrow$ (c)

超伝導現象の発見と物理的理解

- ◆【1913年ノーベル物理学賞】ヘイケ・カメリン・オネスが低温物性研究に貢献(1908年のヘリウムの液化と1911年の超伝導現象の発見)。
- ◆ マイスナー(-オクセンフェルト)効果をヴァルター・マイスナーとローベルト・オクセンフェルトが1933年に発見。
- ◆【1972年ノーベル物理学賞】ジョン・バーディーン、レオン・クーパー、ジョン・ロバート・シュリーファアが超伝導発現機構に関するBCS理論を1957年に発表。
 - バーディーンはノーベル物理学賞を2度受賞した唯一の人物。1956年にトランジスタの発明でも受賞。
- ◆【2003年ノーベル物理学賞】アレクセイ・アブリコソフが第2種超伝導体の渦糸理論を1957年に発表。

Wikipedia

電子-格子相互作用を媒介した電子間引力



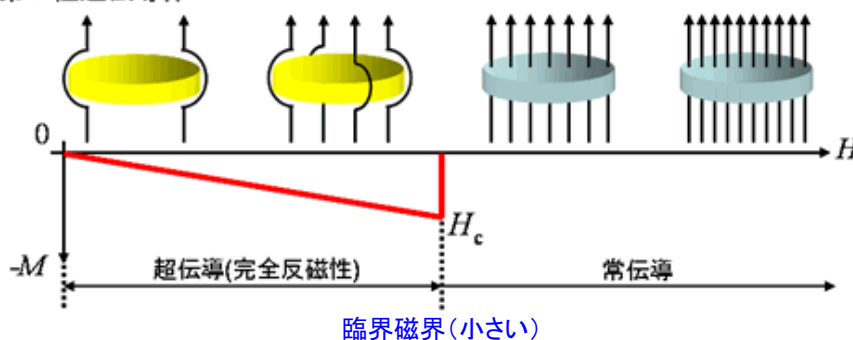
超伝導現象の発見と物理的理解

- ◆【1913年ノーベル物理学賞】ヘイケ・カメリン・オネスが低温物性研究に貢献(1908年のヘリウムの液化と1911年の超伝導現象の発見)。
- ◆ マイスナー(-オクセンフェルト)効果をヴァルター・マイスナーとローベルト・オクセンフェルトが1933年に発見。
- ◆【1972年ノーベル物理学賞】ジョン・バーディーン、レオン・クーパー、ジョン・ロバート・シュリーファアが超伝導発現機構に関するBCS理論を1957年に発表。
 - バーディーンはノーベル物理学賞を2度受賞した唯一の人物。1956年にトランジスタの発明でも受賞。
- ◆【2003年ノーベル物理学賞】アレクセイ・アブリコソフが第2種超伝導体の渦糸理論を1957年に発表。

Wikipedia

「第I種超伝導体」と「第II種超伝導体」

(a) 第I種超伝導体



マイスナー状態

$$B = \mu_0(H + M) = 0$$

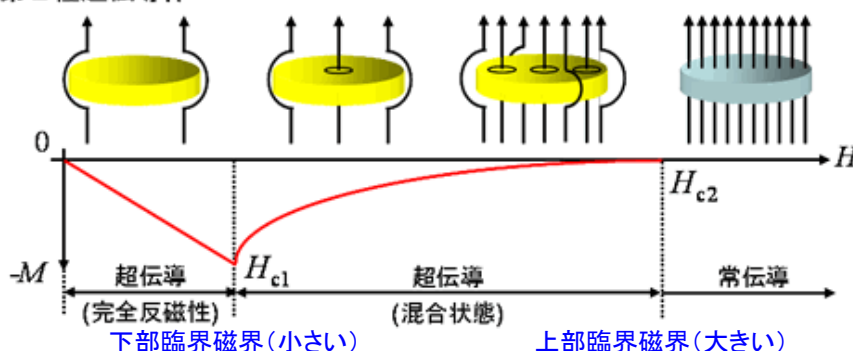
$$\therefore -M = H$$

常伝導状態

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0 H$$

$$\therefore -M = 0$$

(b) 第II種超伝導体



量子化磁束

アブリコソフ格子の観察

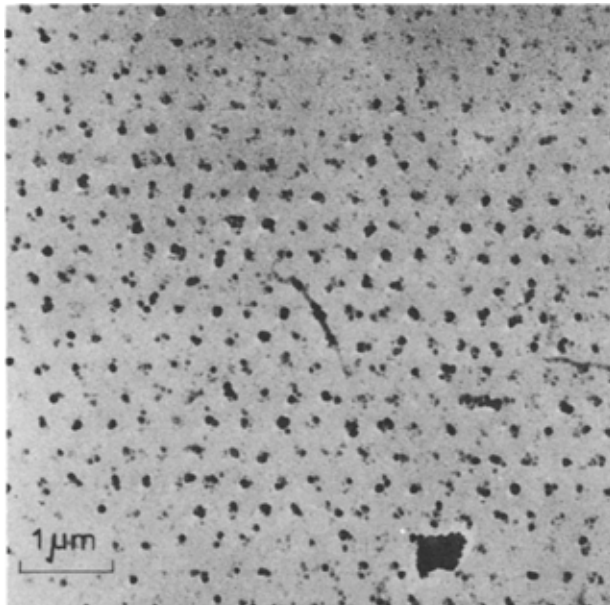
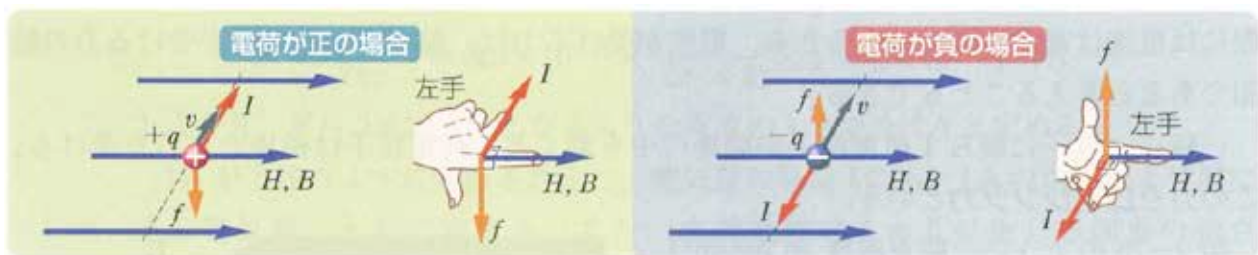


Fig. 1. "Perfect" triangular lattice of flux lines on the surface of a lead-4at%indium rod at 1.1°K. The black dots consist of small cobalt particles which have been stripped from the surface with a carbon replica.

ビッター法
Pb-4at%In棒
1.1 K, 195 G

U.Essmann et al.:
Phys. Lett. A 24 (1967) 526.

ローレンツ力

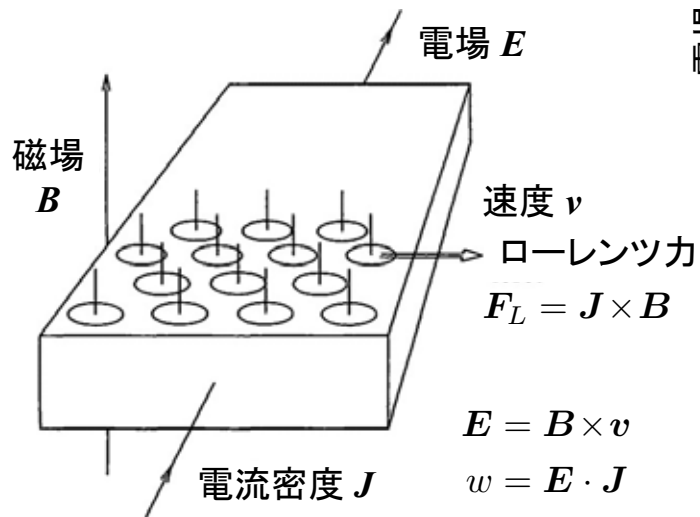


▲図 2-76 ローレンツ力の向き

$$\mathbf{f} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

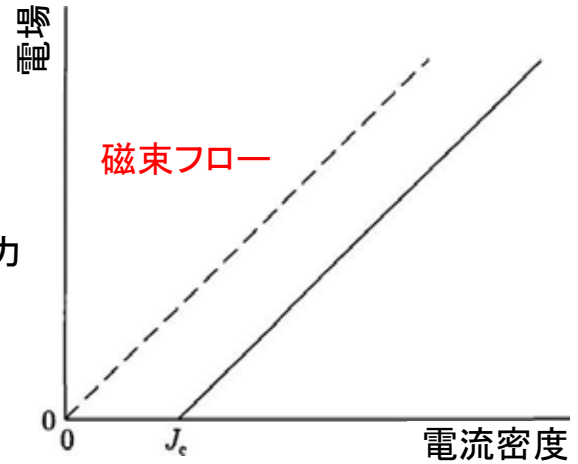
磁束のピン止め

混合状態と量子化磁束



ピンニングセンターの導入
磁束線の運動を抑制

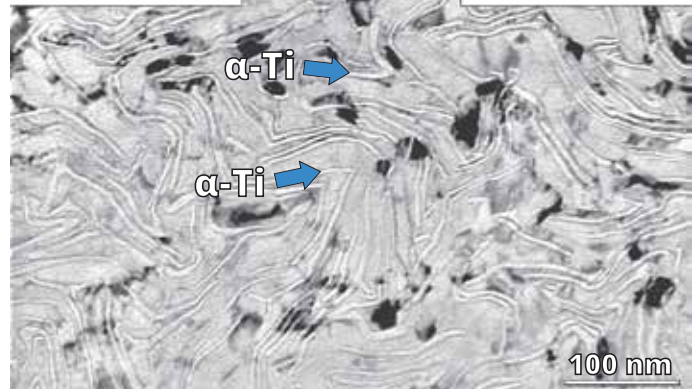
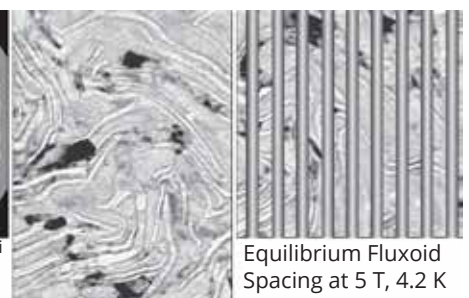
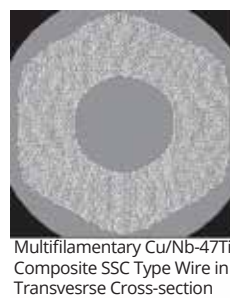
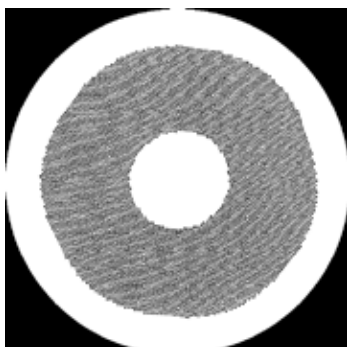
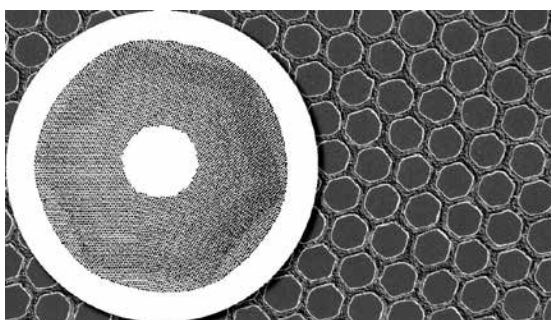
電流電圧特性



破線: 磁束をピン止めしない場合
実線: 磁束をピン止めした場合

臨界電流密度 J_c

NbTi多芯線の例



米国強磁場研究所HP「<https://nationalmaglab.org/>」

講演内容

- ◆ 超伝導現象の基礎
- ◆ 応用例
 - 1) 超電導リニア
 - 2) 核磁気共鳴装置
 - 3) 粒子加速器
 - 4) 核融合炉

リニア中央新幹線の概要

- ◆ 時速500 km(新幹線の約2倍の速さ)で東京と大阪をわずか1時間ほどで結ぶ世界最速の新幹線である。
- ◆ JR東海は、平成39年(2027年)に東京都一名古屋市間で営業運転を開始する方針を発表した。(平成22年4月)
- ◆ 大阪府までの延伸は平成57年(2045年)の開業予定である。
- ◆ 超電導磁石を搭載するリニアモーターカー(超電導リニア)は、ガイドウェイに取り付けられた地上コイルとの磁気相互作用により、10 cmほど浮上して走行する。
- ◆ 開業時の一区間となる山梨リニア実験線(全長42.8 km)において、新型車両L0系を使った走行試験が、平成25年8月29日より開始されている。

山梨県立リニア見学センター「<http://www.linear-museum.pref.yamanashi.jp/>」

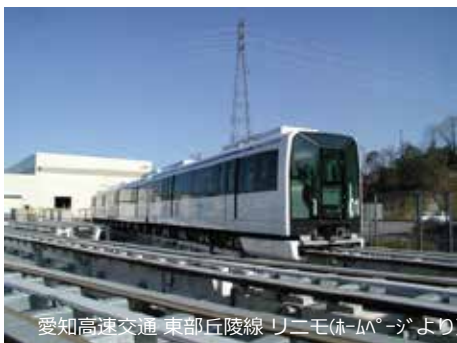
リニアモーターカー(リニア)の仲間たち



超電導リニア



上海マグレブ(中国)



HSST(リニモ)

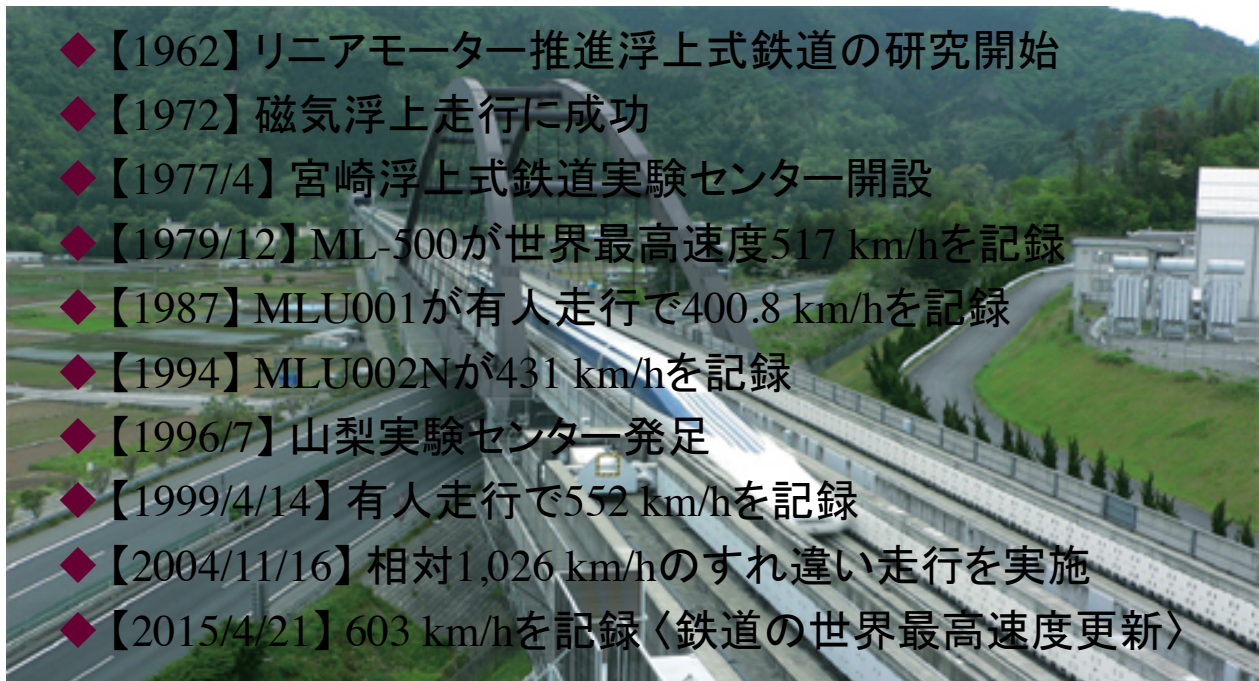


リニアメトロ

リニアの各種方式について

支持方式	磁気浮上式鉄道		車輪式	
リニアモーター方式	電磁誘導方式 (超電導コイル方式)	電磁吸引方式 (常電導コイル方式)		鉄輪式
		浮上・案内兼用式	浮上・案内分離式	
地上側に電磁石や磁石を使用	J R 山梨実験線 : J R 式マグレブ M L X 0 1 - 2 (日) →① E E T (旧西独)		上海トランスラビッ ト : T R - 0 5 (独) →③ M - B a h n (旧西 独)	
地上側に導体 (リアクションプレート) を使用		愛知高速鉄道 1 0 0 L 型 : H S S T (リニ モ) (日) →② バーミンガムピープ ルムーバ (英) トランスラビット (T R - 0 2 (旧西独)	K O M E T (旧西独)	東京都交通局大江 戸線 (リニアメト ロ) (日) →④ ほか地下鉄 4 路線 あり

超電導リニア開発の歴史



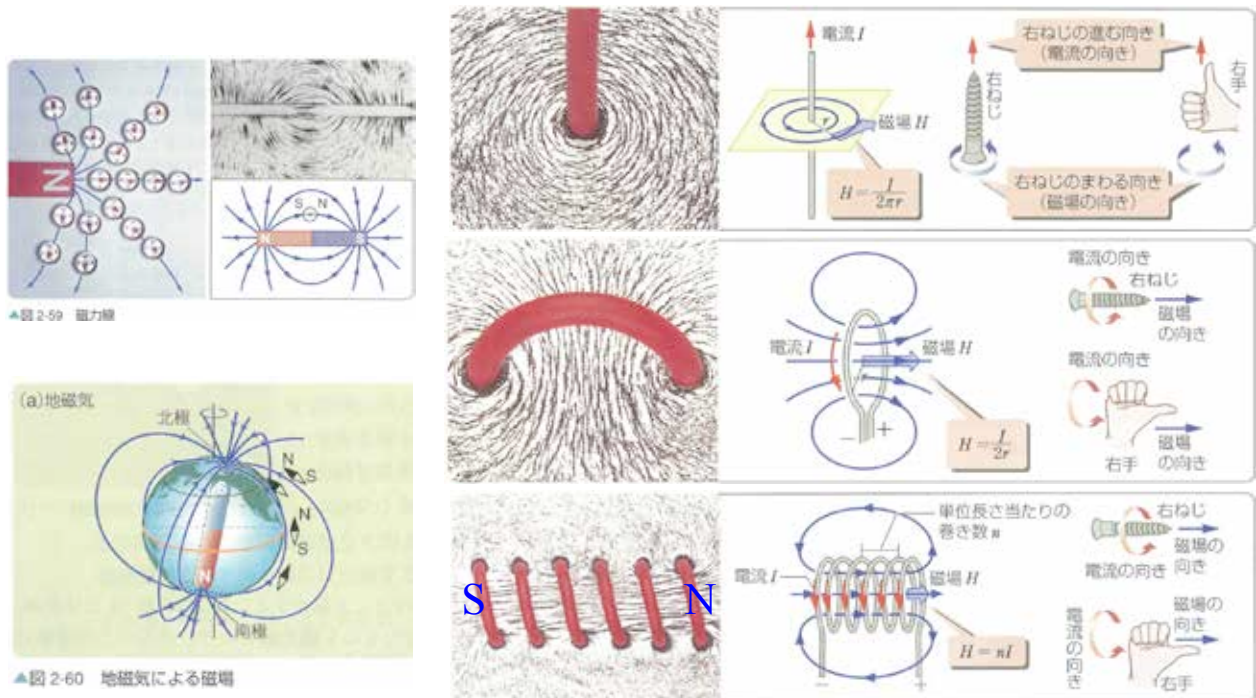
JR東海HP「<http://linear.jr-central.co.jp/>」

リニア中央新幹線の工事着工(2015年)



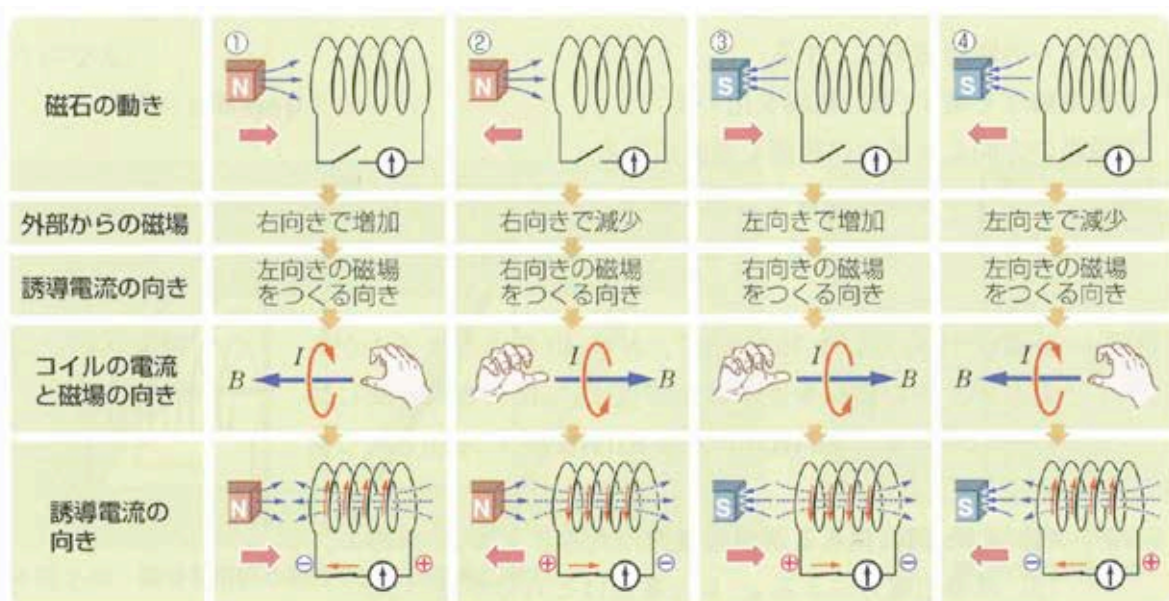
毎日新聞(2013年9月18日)

永久磁石と電磁石



「チャート式 新物理II」(2005)

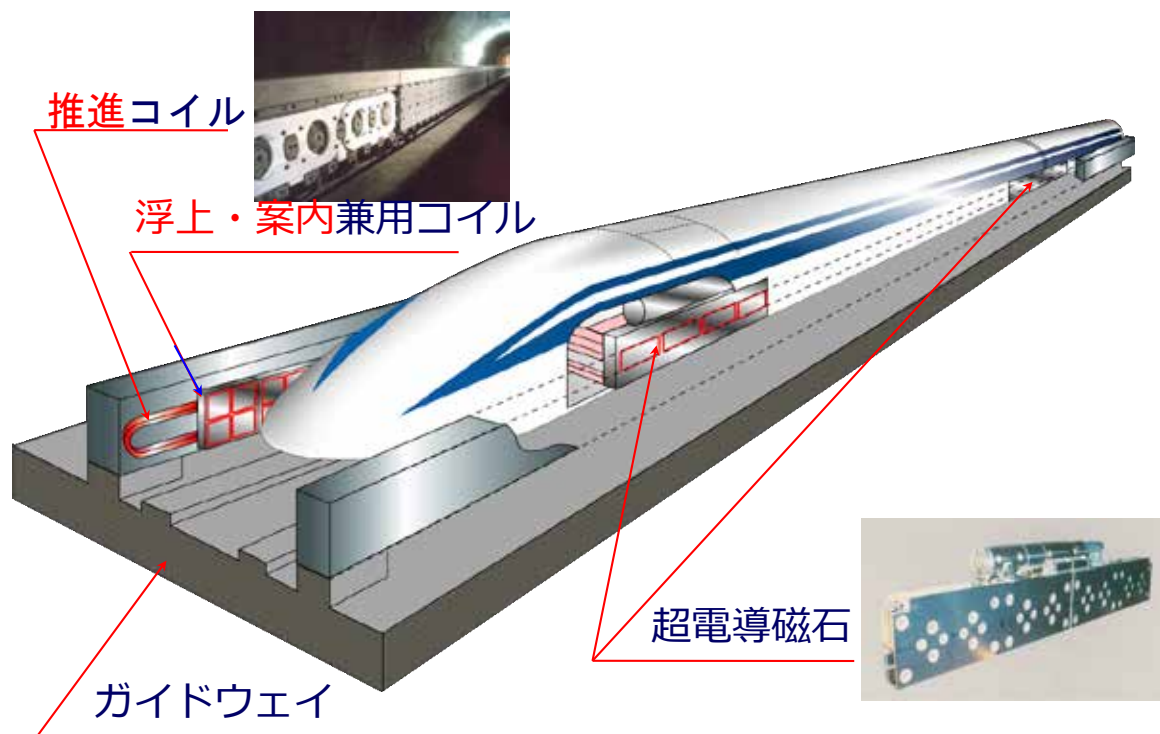
ファラデーの電磁誘導の法則



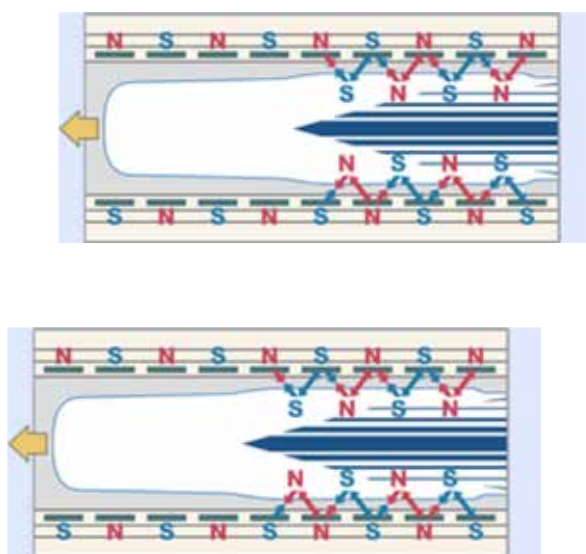
▲図 2-84 コイル内の磁場の変化と誘導電流

「チャート式 新物理II」(2005)

超電導リニアの基本構成

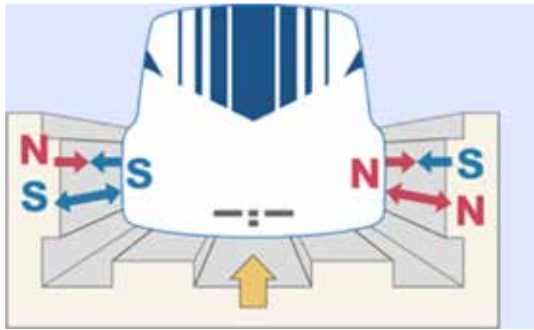


推進・浮上・案内の原理



- ◆ ガイドウェイの推進コイルに電流を流すことにより磁界(交互に配置したN極とS極)が発生し、車両の超電導磁石(N極とS極)との間で、引き合う力と反発する力が発生する。これを利用して車両(超電導磁石)が前進する。

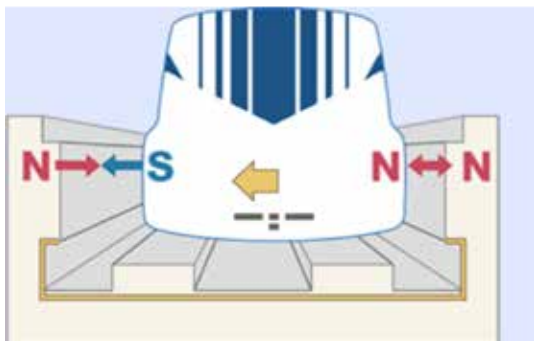
推進・浮上・案内の原理



- ◆ ガイドウェイの側壁両側に浮上（案内）コイルが設置されており、車両（超電導磁石）が高速で通過すると誘導電流が流れて電磁石となり、車両（超電導磁石）を押し上げる力（反発力）と引き上げる力（吸引力）が発生する。

JR東海HP「<http://linear.jr-central.co.jp/>」

推進・浮上・案内の原理



- ◆ ガイドウェイの側壁両側に設置された案内（浮上）コイルは、車両が中心からどちらか一方にずれると誘導電流が流れ、車両の遠ざかった側に吸引力、近づいた側に反発力が働き、車両を常に中央に戻す役目も果たす。

JR東海HP「<http://linear.jr-central.co.jp/>」

リニアライナー 超電導リニアL0系スペシャルセット

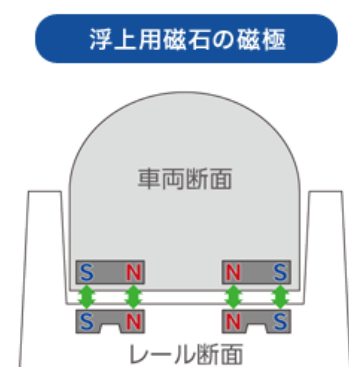
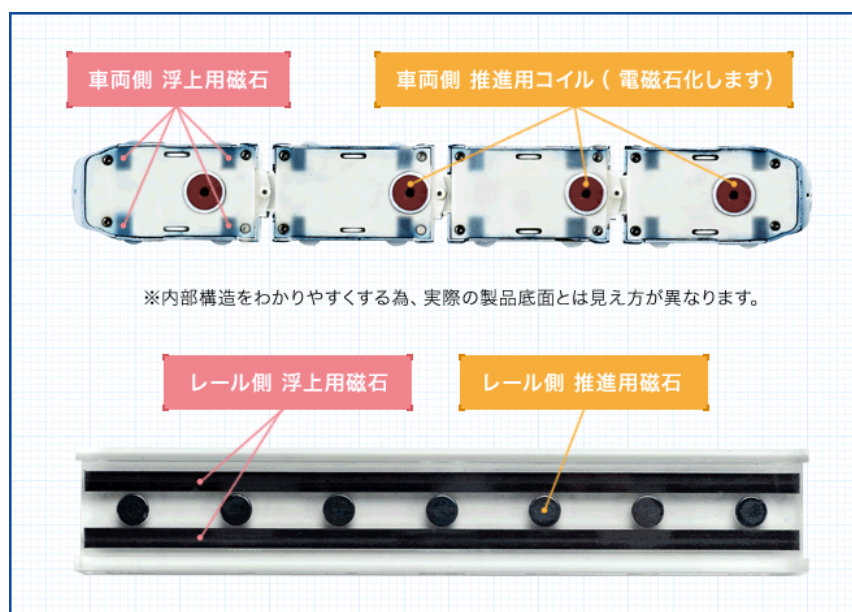


2015年9月発売



タカラトミーHP「<http://www.takaratomy.co.jp/products/linearliner/>」

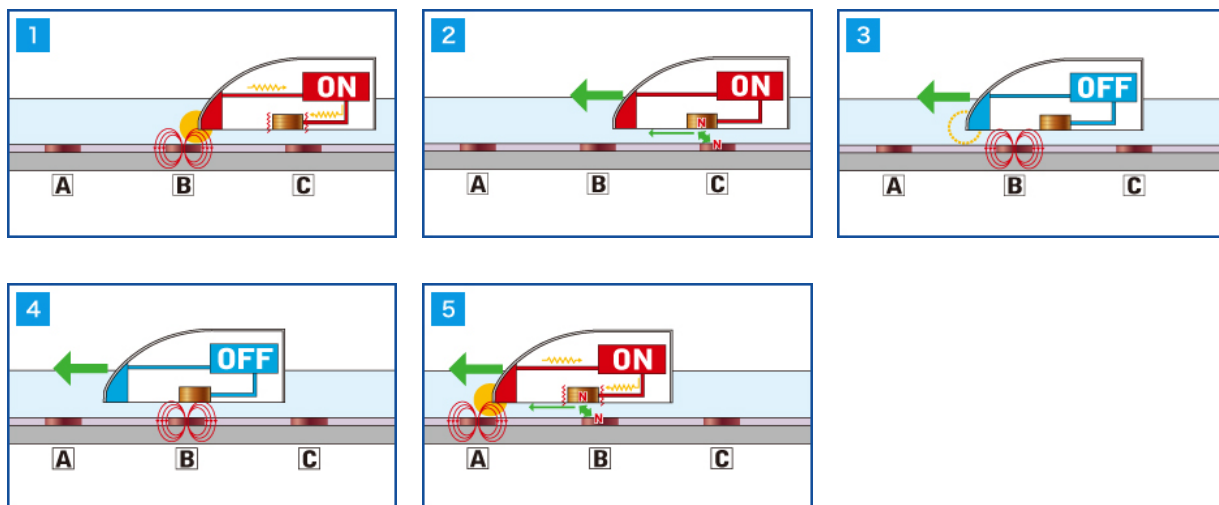
構造と浮上のしくみ



約2 mm浮上

タカラトミーHP「<http://www.takaratomy.co.jp/products/linearliner/>」

走行のしくみ



「※磁石を浮上・走行に活用しているという共通点がありますが、仕組みは超電導リニアとは異なります。」

タカラトミーHP「<http://www.takaratomy.co.jp/products/linearliner/>」

リニア中央新幹線の延伸(2045年開業予定)



日本経済新聞(2014年10月17日)

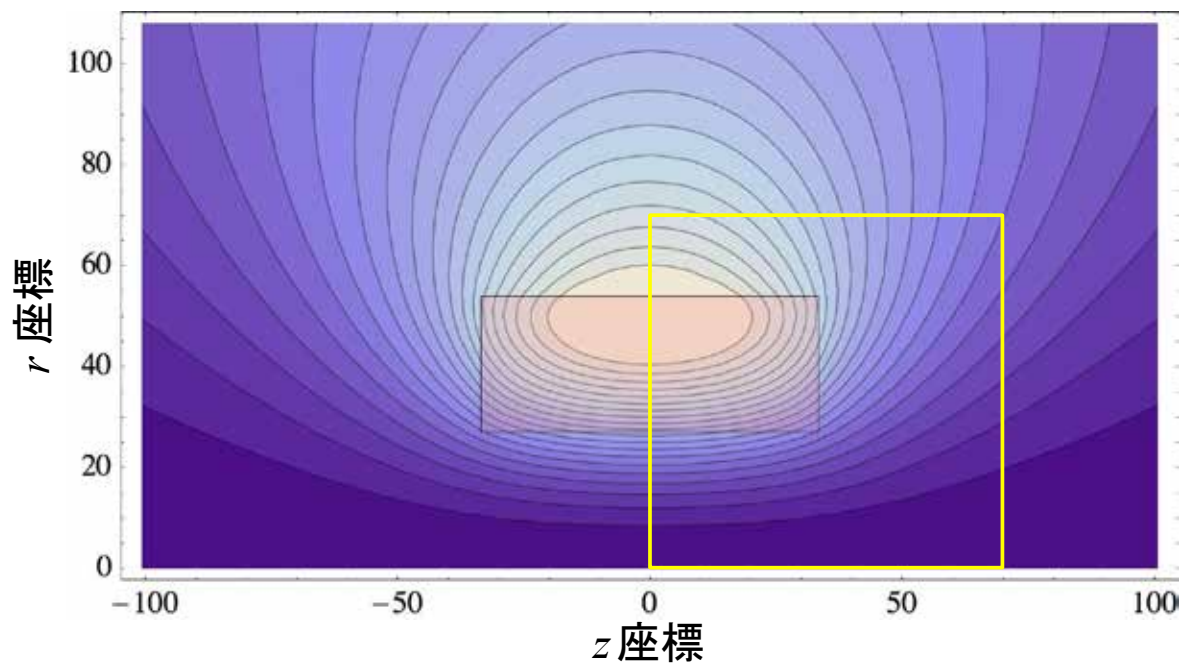
「超電導リニア」のまとめ

- ◆ JR東海は、平成39年(2027年)に東京－名古屋間でリニア中央新幹線の営業運転を開始する予定であり、2015年中に工事を着工する。
- ◆ 大阪までの延伸は平成57年(2045年)の開業予定であり、時速500 kmでわずか1時間ほどで結ばれる。
- ◆ 超電導磁石を搭載し、地上コイルとの磁気相互力により、10 cmほど浮上して走行する。
 - コイルに通電すると電磁石となり、両側にN極とS極が現れる。
 - ファラデーの電磁誘導の法則により、コイルに鎖交する磁束量が変化すると、誘導起電力が生じて電流が流れる。
- ◆ タカトミーの「リニアライナー」は浮上・走行の原理が異なる。

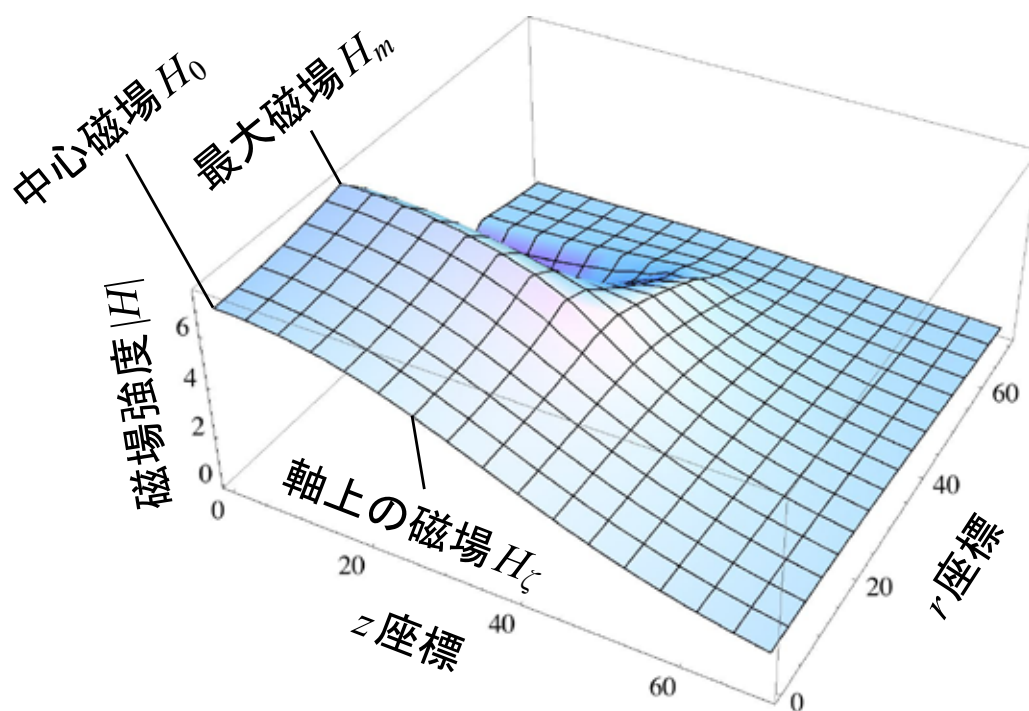
講演内容

- ◆ 超伝導現象の基礎
- ◆ 応用例
 - 1) 超電導リニア
 - 2) 核磁気共鳴装置
 - 3) 粒子加速器
 - 4) 核融合炉

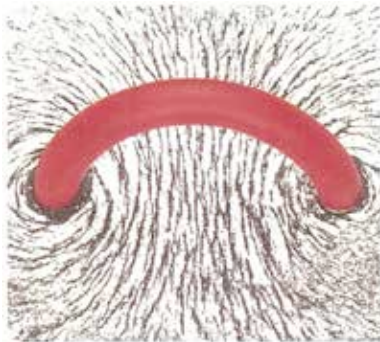
ソレノイド周囲の磁力線分布の一例



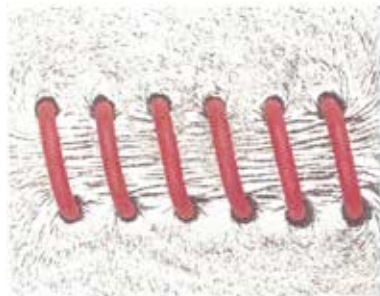
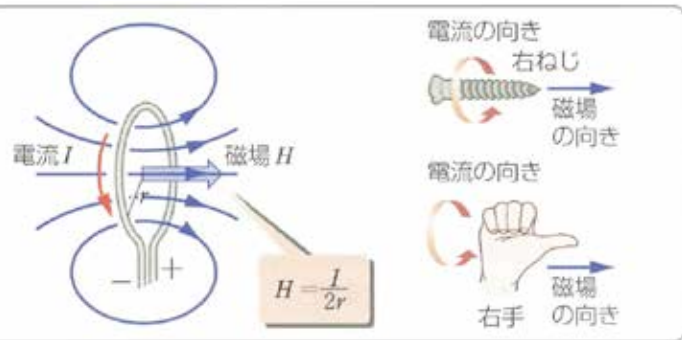
ソレノイド周囲の磁場強度分布の一例



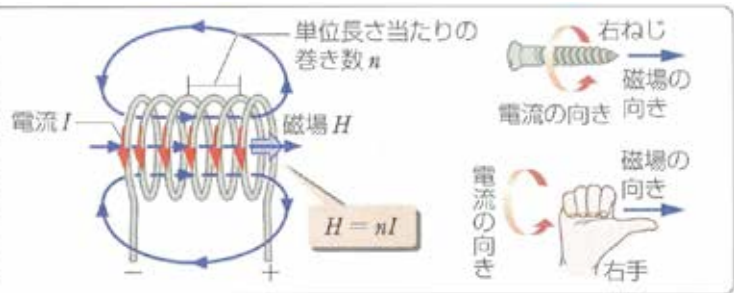
一様な強磁場の発生



▲図 2-66 円形電流がつくる磁場



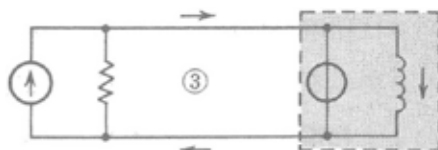
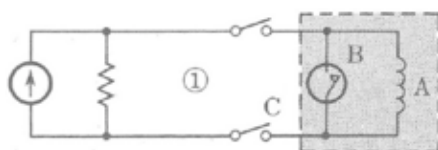
▲図 2-68 ソレノイドがつくる磁場



超電導コイル($n \uparrow, I \uparrow$)の利用

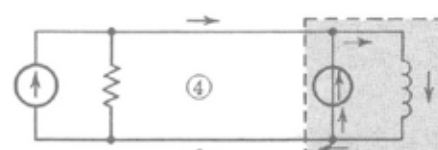
「チャート式 新物理II」(2005)

超電導コイルの励磁方法(永久電流モード)



励磁

永久電流 SW 投入



電源電流をおとす



永久電流モード成立



切り離し

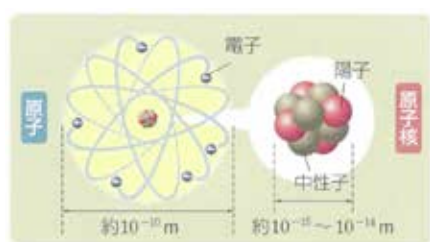
A: 超電導コイル B: 永久電流スイッチ C: 外部スイッチ

図 5.16 永久電流スイッチの動作

電気学会「超電導工学(改訂版)」(1988)

核磁気共鳴(NMR)

- ◆ 磁気モーメントをもつ原子核を磁場の中に入れ、特定の周波数の電磁波を与えると、共鳴してその放射エネルギーを吸収する現象。結晶や分子の構造分析に、医学では断層撮影のMRI(磁気共鳴映像法)などに利用。NMR(nuclear magnetic resonance)。(デジタル大辞泉より引用)



▲図 2-1 原子の構造

表1 $B_0=1T$ の場合の代表的なNMR核種の特性

核種	共鳴周波数 (MHz)	天然存在比 (%)	相対強度	人体構成比 (%)	検出感度
1H	42.6	100	1	63	1
2H	6.536	0.016	0.0096	63	1.5×10^{-6}
^{13}C	10.7	1.1	0.016	9.5	2.7×10^{-5}
^{19}F	40.1	100	0.834	0	0
^{23}Na	11.3	100	0.093	0.04	6.0×10^{-5}
^{31}P	17.2	100	0.066	0.2	2.0×10^{-4}
^{14}N	3.1	99.6	1.0×10^{-3}	1.3	2.1×10^{-5}

NMR核種は陽子または中性子の数が奇数の原子核である。

下記の出典をもとに作成した。

【出典】池平博夫:特集「MRIの新技术と臨床応用」、MRスペクトロスコピーの現況、日独医報、Vol.39、No.4、p.100(1994)

「チャート式 新物理II」(2005)

高度情報科学技術研究機構HP「<http://www.rist.or.jp/>」

関連のノーベル賞受賞者

- ◆【1944年ノーベル物理学賞】イシドール・ラビが塩化リチウムの分子線を用いてNMR信号を検出することに成功。
- ◆【1952年ノーベル物理学賞】エドワード・パーセルがパラフィン、フェリックス・ブロッホが硝酸鉄(III)水溶液を用いて凝縮系のNMR信号を検出することに成功。
- ◆【1991年ノーベル化学賞】リヒャルト・エルンストがフーリエ変換NMR分光法の確立に貢献。
- ◆【2002年ノーベル化学賞】クルト・ヴェートリッヒがNMRによる高分子の高分解能測定法を提唱。(田中耕一氏と同時)
- ◆【2003年ノーベル生理学・医学賞】ポール・ラウターバーとピーター・マンズフィールドがMRIの発見と発展に貢献。

核磁気共鳴、核磁気共鳴画像法@Wikipedia

磁気共鳴イメージング(MRI)／核磁気共鳴(NMR)装置

MRI装置 (1.5 T → 3.0 T)

東芝メディカルシステムズ製



日立メディコ製

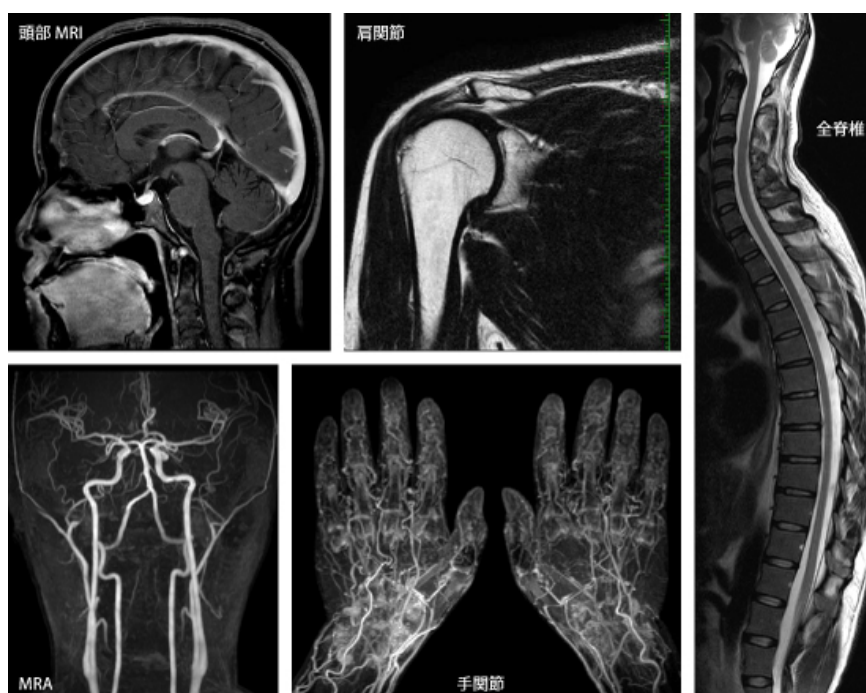
NMR装置

中心磁場
14.1 T



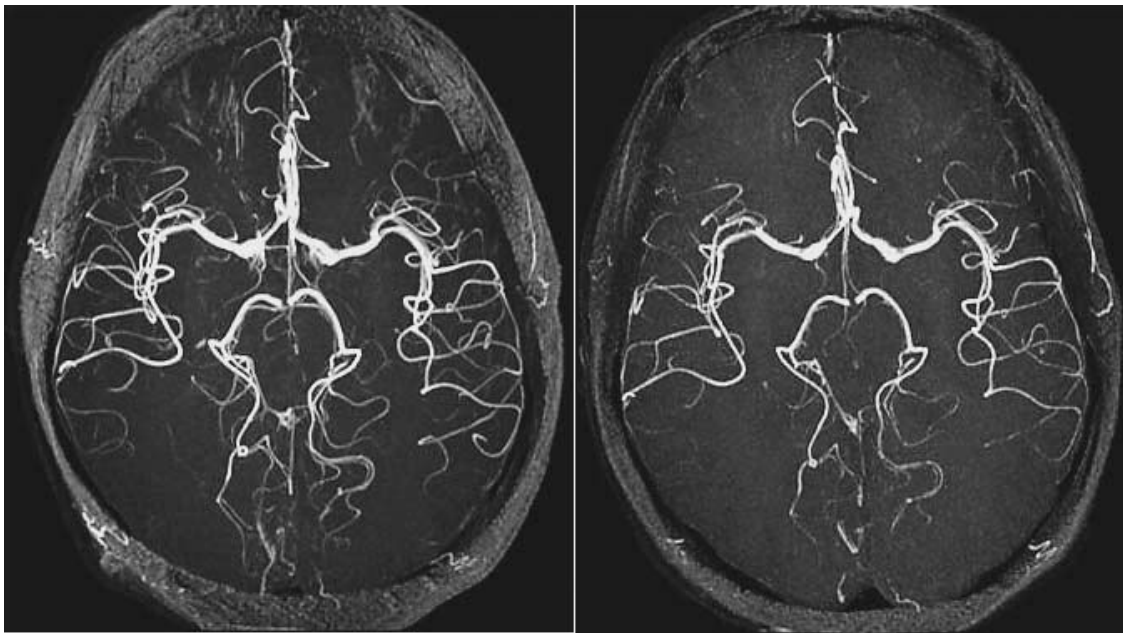
ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー製

MRI断層撮影画像の例



八重洲クリニックHP「<http://www.m-satellite.jp/>」

磁場強度の影響



(画像一左:3.0 T、右:1.5 T、提供:GE横河メディカルシステム)

http://www.daihougi.ne.jp/science_division/column/column27/column27.html

「核磁気共鳴装置」のまとめ

- ◆ ソレノイドの内部には一様な磁場が発生する。また、巻数と電流を大きくするほど発生磁場は強くなる。
 - ジュール熱のない超電導コイルの利用
 - 超電導コイルは永久電流モードで運転される。
- ◆ 核磁気共鳴(NMR)とは、磁気モーメントをもつ原子核を磁場の中に入れ、特定の周波数の電磁波を与えると、共鳴してその放射エネルギーを吸収する現象である。
 - 結晶や分子の構造分析に、医学では断層撮影のMRI(磁気共鳴映像法)などに利用
- ◆ 国内外の多くの企業がMRI/NMR装置を開発・販売している。
- ◆ 磁場を強くするほど、解像度が良くなる。

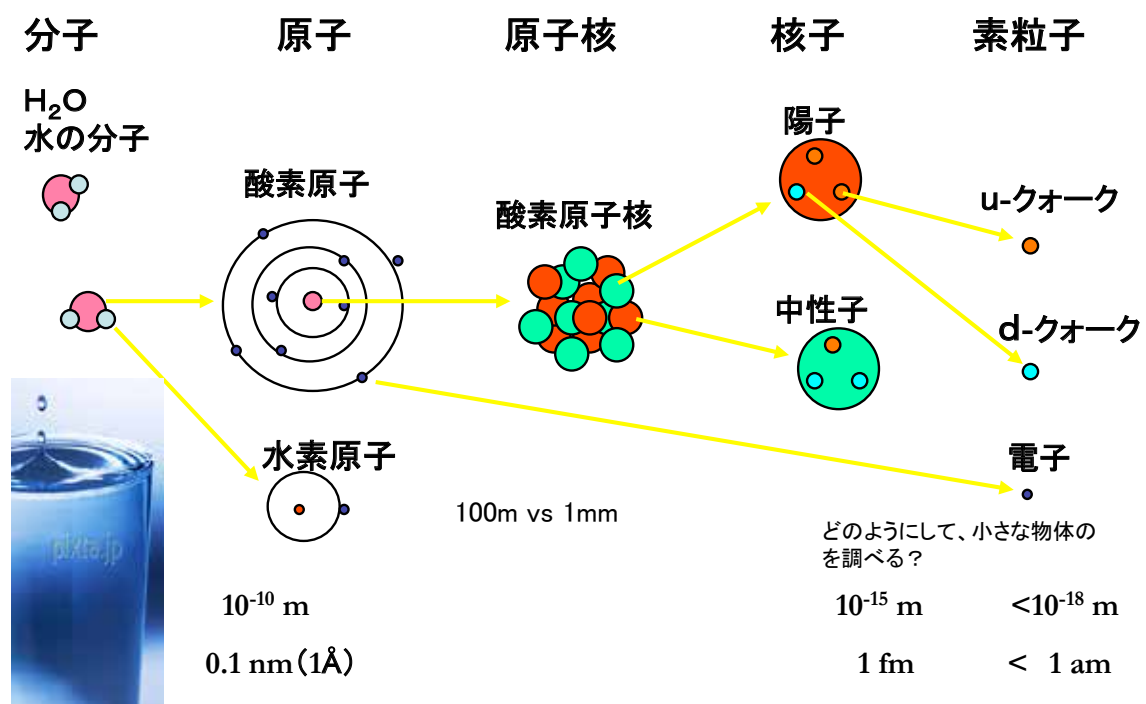
講演内容

◆ 超伝導現象の基礎

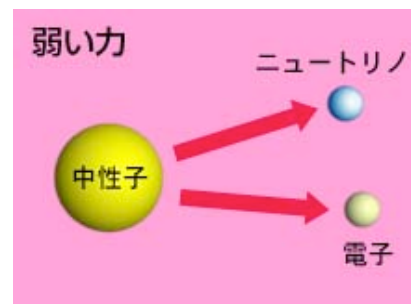
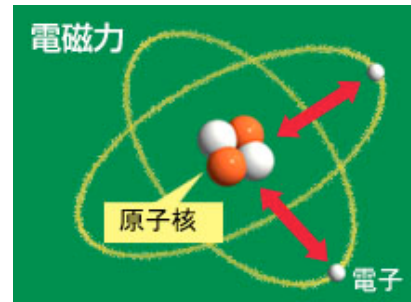
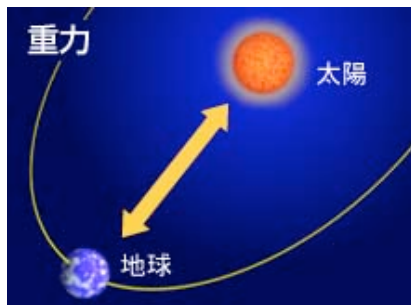
◆ 応用例

- 1) 超電導リニア
- 2) 核磁気共鳴装置
- 3) 粒子加速器
- 4) 核融合炉

物質の階層構造



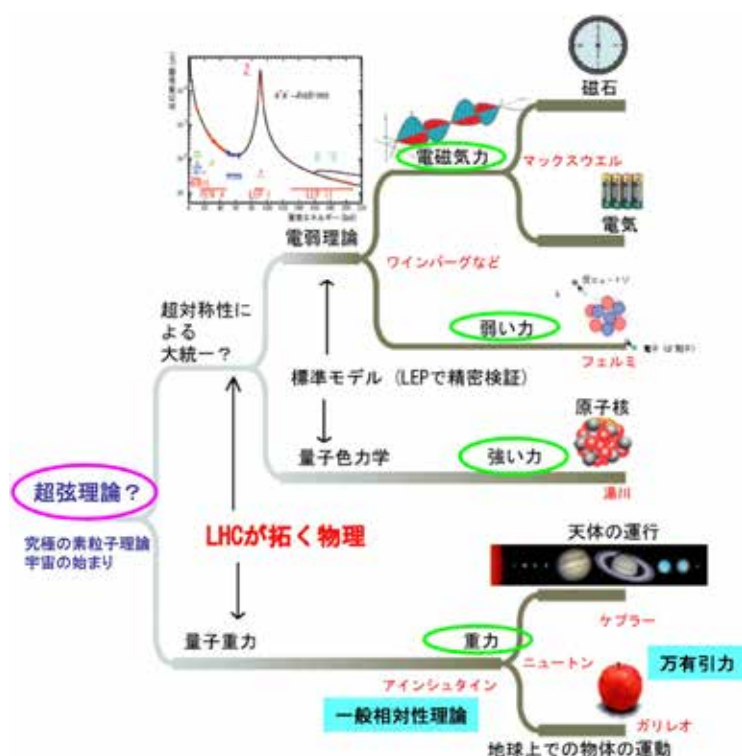
自然界の4つの力



湯川先生が予言

(中性子は陽子に変わる)

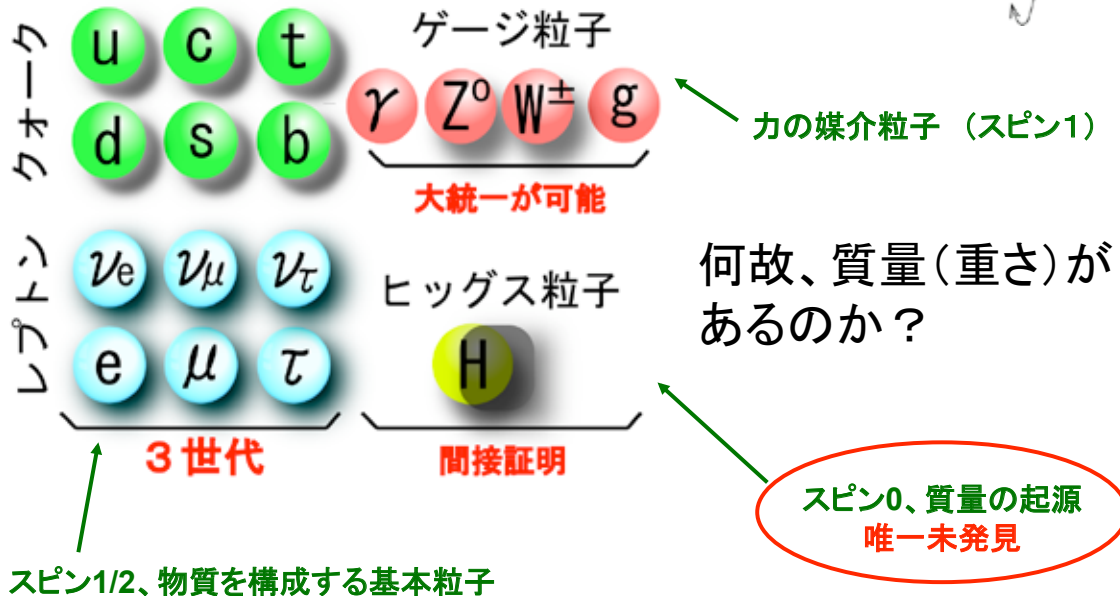
物理学における「力の統一」の歴史



- ◆【標準モデル】電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に記述するワインバーグ＝サラムの理論と、強い相互作用を記述する量子色力学を組み合わせた場の量子論。
- ◆【超弦理論】素粒子を点ではなく振動・回転する弦(ひも)と考えて、4つの力を統一的な枠組みで表すことを目指す統一理論(仮説)。

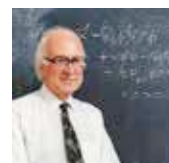
標準モデルを構成する素粒子(17種類)

現在の標準モデルに登場する素粒子



「質量の起源」に関する理論(1964年)

真空中に満ちたヒッグスがプールの水の役割を果たす素粒子とヒッグス粒子がぶつかり(反応し)速度が遅くなる(質量が生じる)。

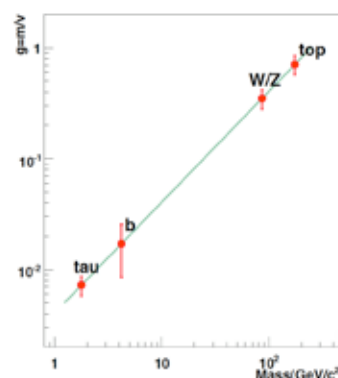


ピーター・ヒッグス
2013年ノーベル物理学賞



部屋にごった返している群衆(青色__): ヒッグス粒子
部屋に人(素粒子)が入ってきます。
この人が人気ものだ、 $「わー」$ とサインを求める人が廻りにあつまり歩けなく遅くなる: 質量が生じる

質量の違い:
上の絵では「人気度」
(人気者ほど歩けなくなる: 重くなる)
ヒッグス粒子との結合の強さが重さに比例



大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)

スイス・フランス国境に跨り 地下100m トンネル

フランス側

円周27kmのリング

ジュラ山脈
(1.5億年前)

CERN
(Conseil Européen pour la
Recherche Nucléaire:
欧州原子核研究機構)

Geneva空港

ジュネーブの街

スイス側

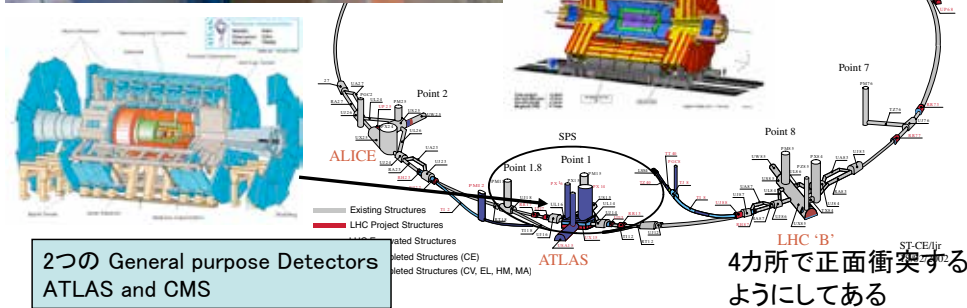


2つの検出器 (アトラスとCMS)



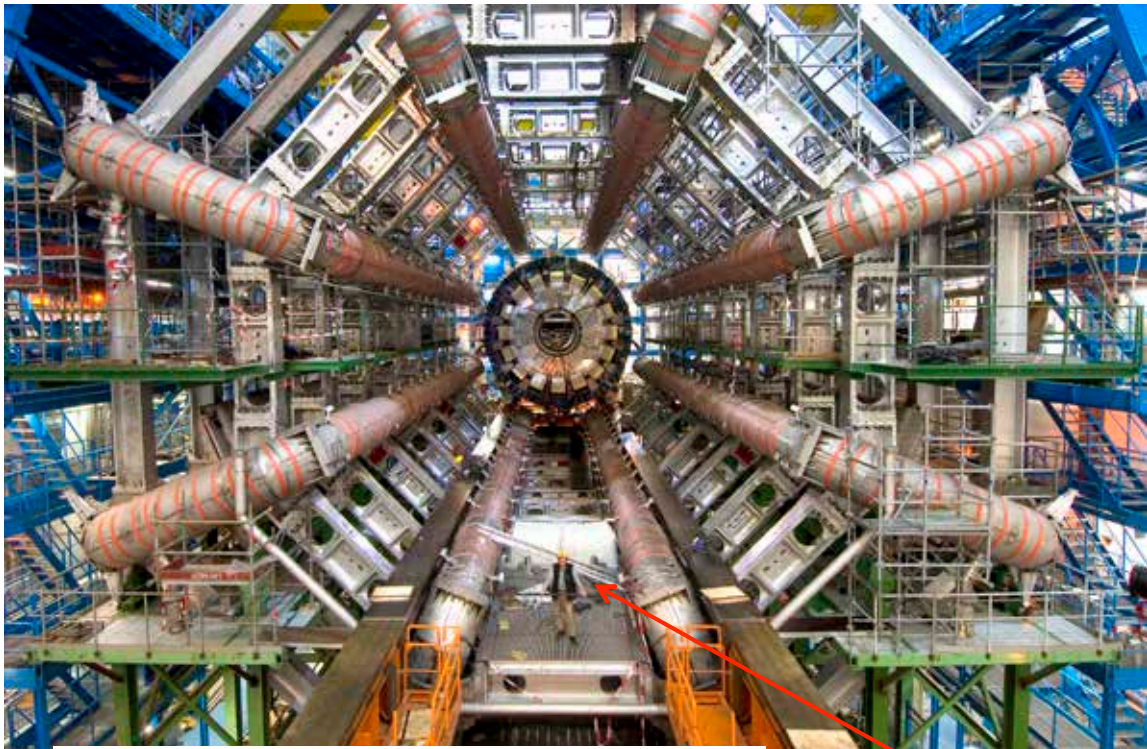
一周27 km LHC 地下トンネル,
8.3T超伝導磁石
15mの1232本 しきつめる。

光の速度 0.999999999まで
陽子を加速(7TeV)



ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) & CMS (Compact Muon Solenoid)

建設中のアトラス検出器

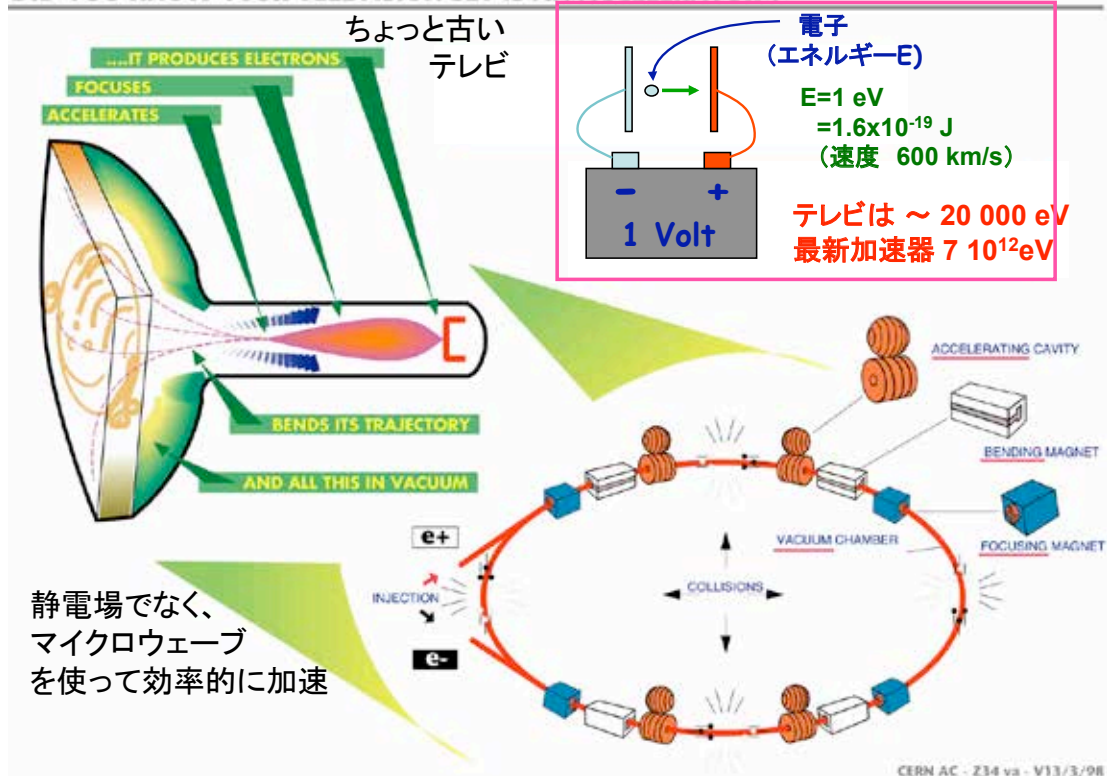


粒子を曲げるために大型超伝導磁石

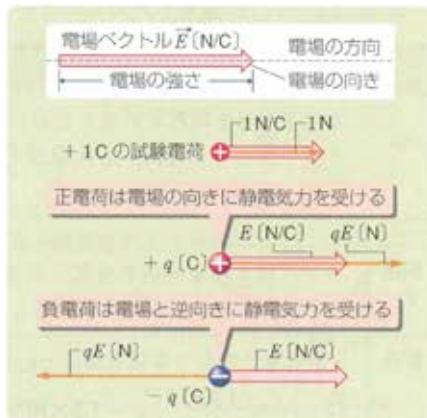
人間

荷電粒子の加速と偏向／集束

DID YOU KNOW YOUR TELEVISION SET IS AN ACCELERATOR ?



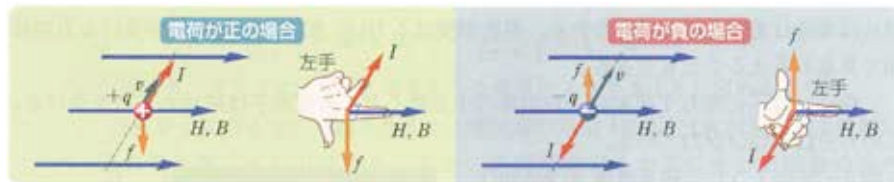
電場 E と磁場 B による力



▲図 2-4 電場ベクトルと静電気力の関係

$$F = qE$$

$$f = qv \times B$$



▲図 2-76 ローレンツ力の向き

「チャート式 新物理II」(2005)

超伝導キャビティ(高周波加速空洞)の例

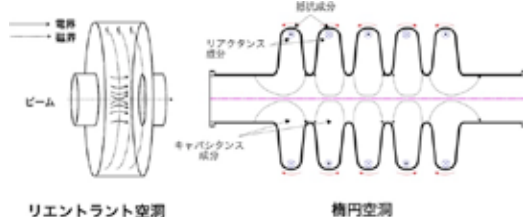


Fig. 7 リエントラント型空洞と楕円空洞の加速原理

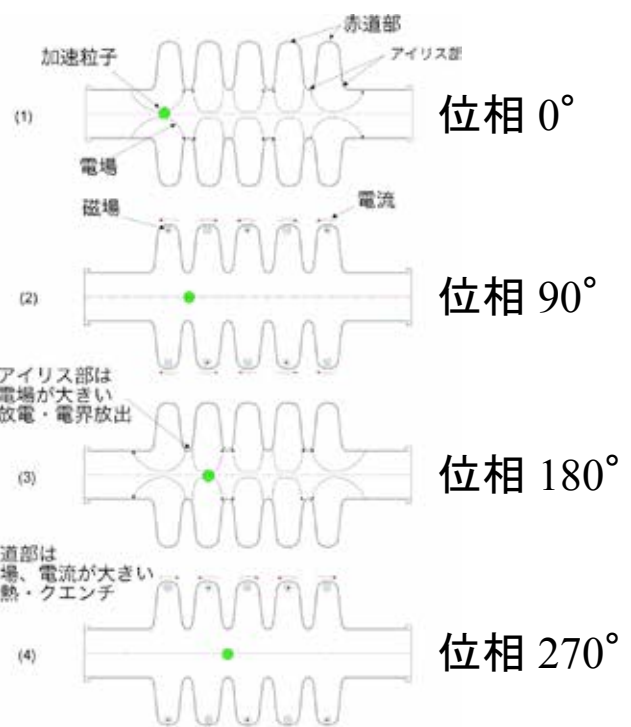
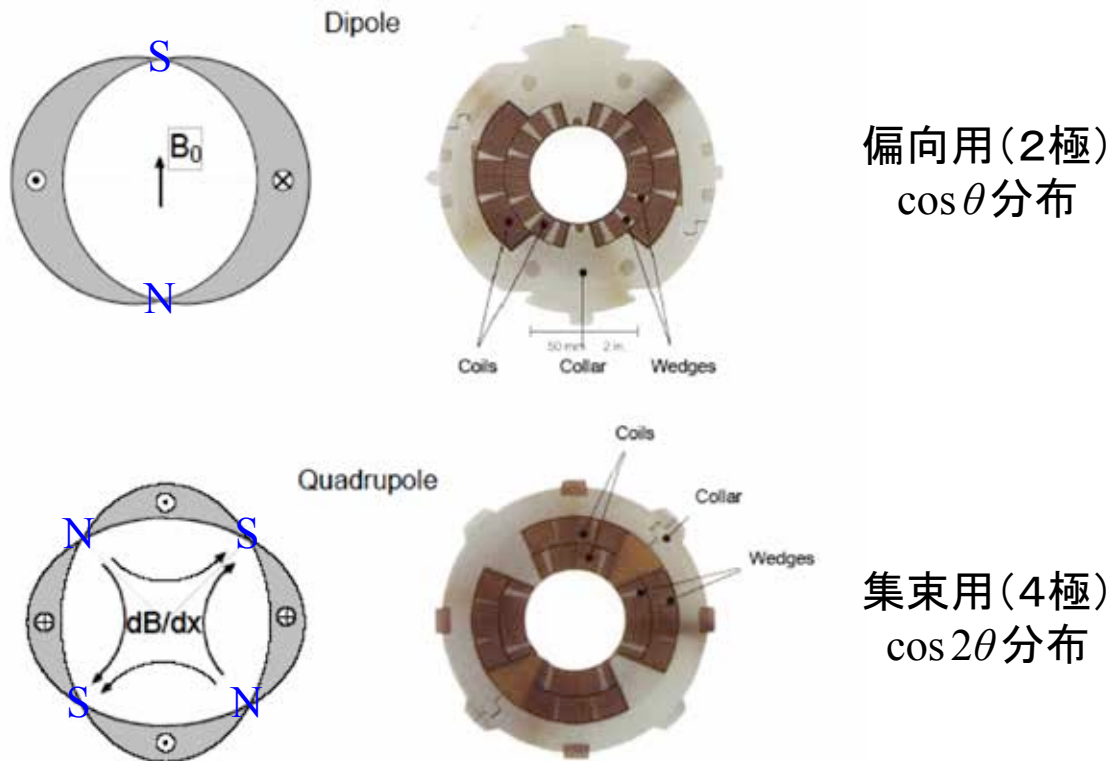


Fig.8 楕円空洞内での加速粒子の様子

荷電粒子を偏向／集束する超伝導磁石の例



ヒッグス粒子の発見(2012年7月4日)

科学・科学記事
ヒッグス粒子とみられる新粒子発見 国際チーム
年内にも確認
2012/7/4 20:48

【ジュネーブ＝藤田剛】欧州合同原子核研究機関（CERN）は4日、物の質量（重さ）の起源とされる「ヒッグス粒子」とみられる新しい粒子を発見したと発表した。2つの国際チームによる大型加速器を使った探検実験で、新粒子が99.9999%以上の確率で存在するとの結果を得た。年内にもヒッグス粒子と最終的に確認される位置が大きく、成功すればノーベル賞級の発見となる。

CERNのボイヤー所長は同日、「ヒッグス粒子と（特徴が）合致する新粒子の発見に成功した」と述べた。新粒子がヒッグス粒子と確認されれば、宇宙の成り立ちの解明が大きく前進する。

実験したのは、東京大学など日本の16の大学・研究機関も参加する「アトラス」と、欧米の「CMS」の2チーム。

CERNによると、今年6月までの実験で、両チームともヒッグス粒子とみられる新粒子が存在する確率が99.9999%以上になった。昨年末の段階ではアトラスは約98.9%、CMSは約9.7%の確率で、「発見の可能性が高まった」としていた。

99.9999%という確率は物理学の世界での「発見」に相当するが、新粒子が予言されているヒッグス粒子とどこまで一致しているかを確認するため、今年いっぱいの実験で詰める。

新粒子の重さは陽子の120倍と、これまで発見された素粒子（物質の最小単位）の中では比較的重かった。

宇宙の始まりである137億年前の「ビッグバン（大爆発）」で生まれた素粒子は、最初は質量を持たず光速で自由に飛び回っていた。ビッグバンの100億分の1秒後にヒッグス粒子が生まれ、宇宙を満たしたため、素粒子は動きにくくなり、質量が蓄わったとされる。

実験では一周27キロメートルの円形加速器で陽子同士を光速近くで衝突させ、ビッグバンを再現。ヒッグス粒子は瞬時にほかの粒子に変化してしまうため、飛び散った粒子の中からヒッグス粒子の痕跡を集め、存在する確率を割り出していた。



日本経済新聞(2012年7月4日)

「東芝」の貢献

- ◆ アトラス粒子検出器用超伝導ソレノイド
 - 粒子の識別に必要な磁場を発生させる
 - 外部の検出器用に粒子を通過させることが必要
 - 内径 2.46 m、厚み 45 mm、長さ 5.3 m、中心磁場 2 T
- ◆ ビーム収束用4極超伝導マグネット(MQX-A)
 - 外径 47 cm、全長 7 m、最大磁場 9 T
 - 設計と実際の巻付け位置のずれが50 μm 以下
- ◆ ATLAS Supplier Award(2002年)、CERN Award(2010年)



<https://www.toshiba.co.jp/special/higgs/>

「古河電工」の貢献

古河電工の貢献

CERNの「大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)」では、陽子を光の速さまでに加速したり、円形のカーブをうまく曲がれるように方向付けするなど、陽子をコントロールするために強い磁場が用いられています。その強い磁場を生み出すため超伝導電磁石が使われており、陽子が走るパイプはその電磁石の中心に収められています。また、衝突した陽子から出てくる素粒子を検出する装置にも、特殊な巨大超伝導電磁石が使われています。

この磁石の膨大な量の超伝導線材には、古河電工製が使われています。これまでにない繊細な技術が必要で、世界中どこをさがしても他にみつかるころはなかったそうです。

特に高い技術が必要としたこの実験装置の心臓部とも言われる部分を古河電工が担っているのです。

製造過程では、極めて小さなゴミでも断線の原因になるので、徹底的に不純物を取り除くことが要求されました。その上、よりあわせてケーブルにする技術も難しく、おまけに要求量も多く、難題山積でした。しかし、さまざまな工夫で試行錯誤を繰り返した結果、世界で最も早く要求を満たす優れたものを実現しました。古河電工の超伝導線材がなければヒッグス粒子の発見はもっと先になっただろうとも言われています。この功績を認められ、2004年9月、CERNから「ゴールド・ハドロン賞」を授与されました。

名: L. Evans 氏
(LHC プロジェクトリーダー)

ゴールド・ハドロン賞を受賞
(2004年9月 CERNにて)

LHCケーブル

構造 6000本以上の銅に包まれた棒状の超伝導物質を隙間なくぎっしり詰め込んだ長さ1mほどの筒状のものを900℃まで熱し押し出してくっけます。その後100回以上引き伸ばして直径0.8mmまでの束線にします。このときの長さは55kmにもなります。この束線を36本よりあわせて形を整え750mV1本のケーブルにします。

超伝導磁石用
ラザフォードケーブル

「粒子加速器」のまとめ

- ◆ 素粒子とは、物質や場を構成する最小単位とみられる粒子
- ◆ 素粒子間にはたらく4つの力のうち、3つの力を統一する標準モデルが構築されている。
- ◆ 標準モデルを構成する素粒子は17種類あり、最後のヒッグス粒子が2012年7月に発見された。
 - ピーター・ヒッグス博士が質量の起源に関する理論を1964年に提唱
 - スイス・ジュネーブ郊外に建設された大型ハドロン衝突型加速器(LHC)を用いて実験
 - 荷電粒子を加速する超伝導キャビティ
 - 荷電粒子を偏向／集束する2極／4極超伝導磁石
 - アトラス検出器用超伝導ソレノイド

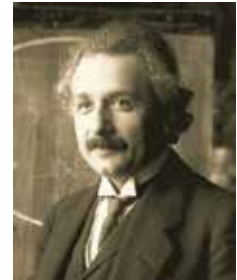
講演内容

- ◆ 超伝導現象の基礎
- ◆ 応用例
 - 1) 超電導リニア
 - 2) 核磁気共鳴装置
 - 3) 粒子加速器
 - 4) 核融合炉

質量 m とエネルギー E の等価性

- ◆ アルベルト・アインシュタインが発表した特殊相対性理論(1905年)の帰結の1つ

$$E = mc^2 \quad c = 299,792,458 \text{ m/s}$$



1 MeV = 1.6×10^{-13} J, 1 原子質量単位(u) = 931 MeV

重要

4-7

質量とエネルギーの等価性

質量とエネルギーは比例関係にある

静止エネルギー $E = mc^2$

(4・40)

原子核の結合エネルギー $\Delta E = \Delta mc^2$

(4・41)

(Δm は中性子と陽子の質量の合計－原子核の質量)

「チャート式 新物理II」(2005)

「核分裂」と「核融合」

核分裂の原理

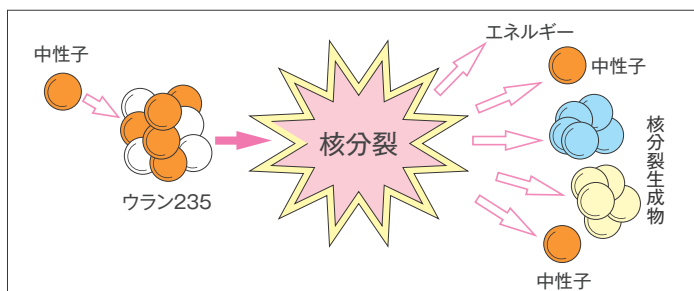
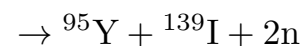


表2 核分裂前後の質量の比較

核分裂前の質量 (1)	核分裂後の質量 (2)	質量欠損 (1)－(2)
$^{235}_{92}\text{U}$ 235.124	$^{95}_{39}\text{Y}$ 94.945	
中性子1個 1.009	$^{139}_{53}\text{I}$ 138.965	
	中性子2個 2.018	
合 計 236.133	合 計 235.918	0.215

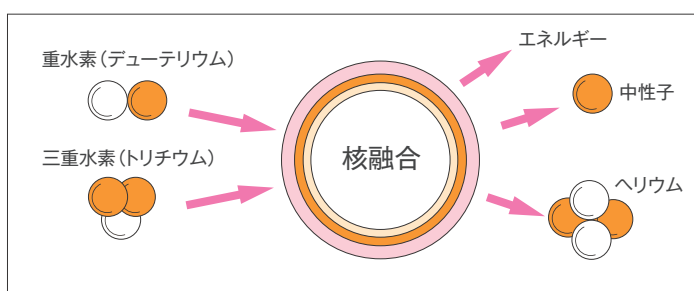
【出典】[社]火力原子力発電技術協会[編、刊]「やさしい原子力発電(火原協会講座15) (1995年6月), p.7

【ウラン235の一例】

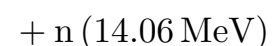
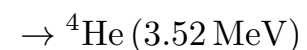
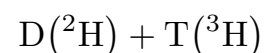


$$0.215 \text{ amu} = 200.3 \text{ MeV}$$

核融合の原理

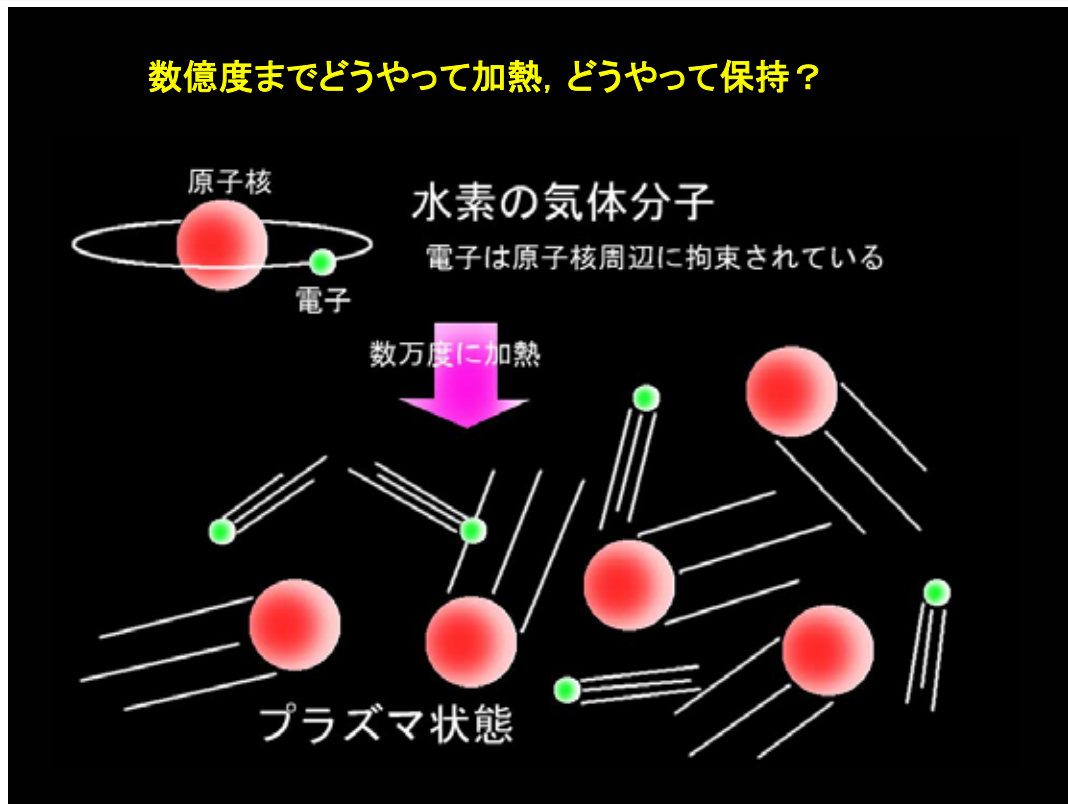


【D-T反応】



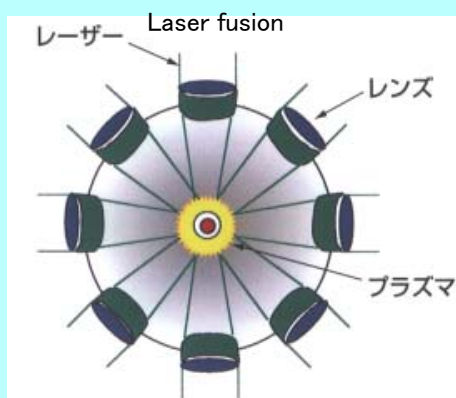
【太陽】陽子-陽子連鎖反応

プラズマ(固体／液体／気体に続く第4の状態)



核融合エネルギーを実現する2つの方式

レーザー方式



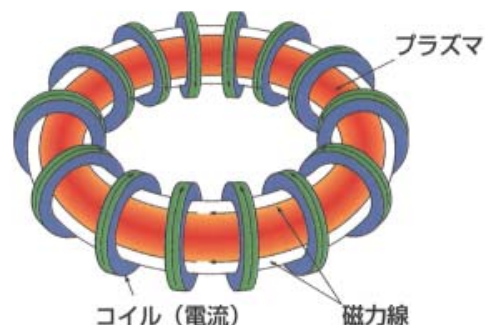
核融合の燃料(水素)を詰めた直径数ミリの球を強力なレーザー光で照射し、瞬間加熱。飛び散ってしまう前に核融合を起こさせる。これを繰り返すことでエネルギーを連続して出す。

人工の超新星

artificial super nova

磁場方式

magnetic confinement fusion

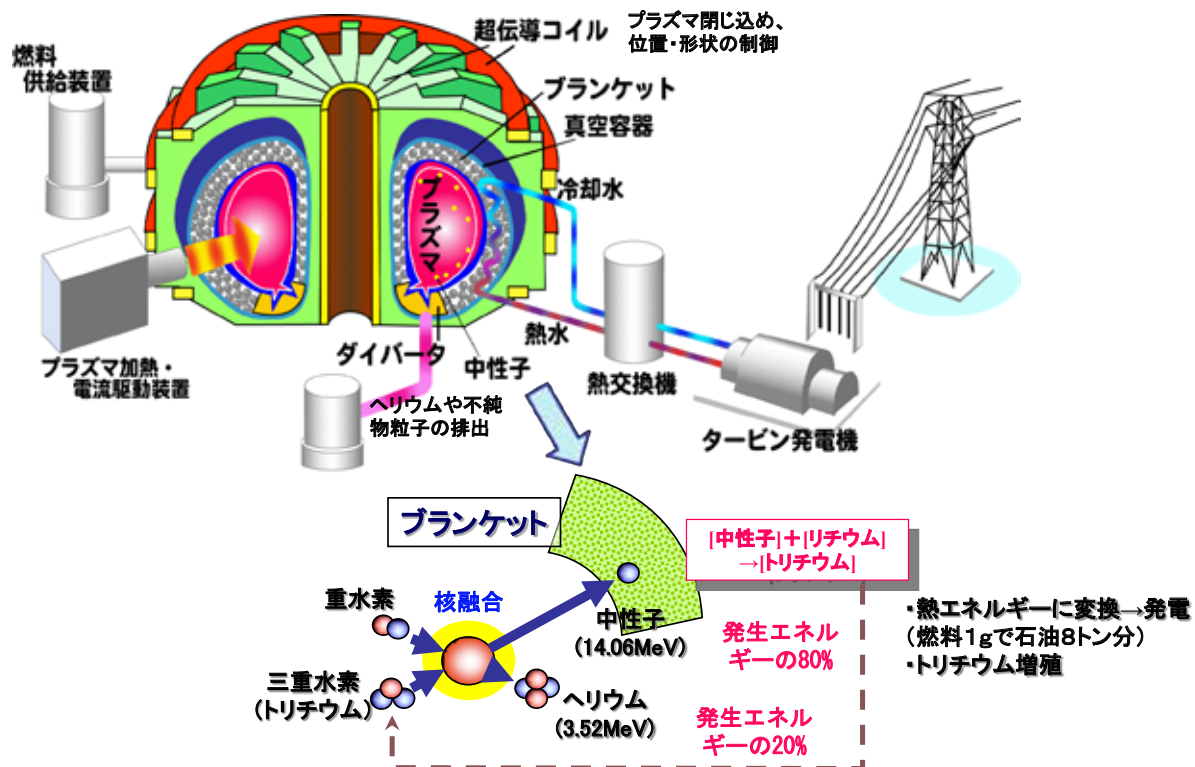


プラズマが磁場を横切れないことを利用。ドーナツ状の磁場を作って、その中に1億度の水素ガス(プラズマ)を封入し核融合を起こす。

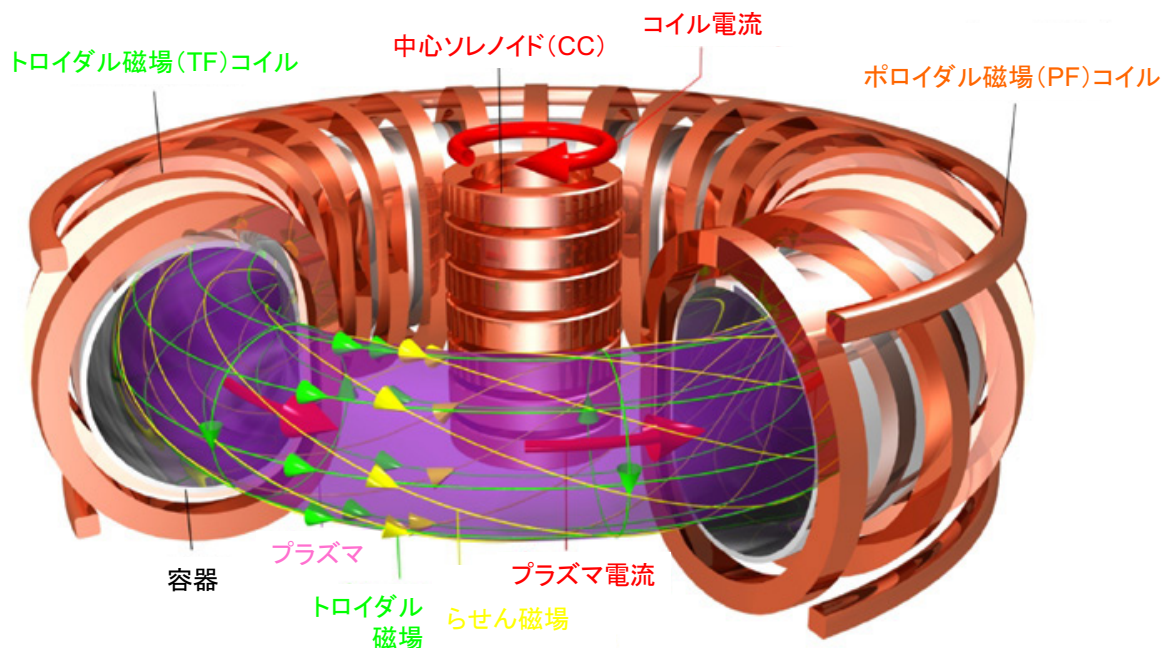
人工の太陽

artificial star

磁場方式核融合発電のしくみ



超伝導コイルの磁場によるプラズマの閉じ込め



国際熱核融合実験炉(ITER)計画の目的と概要

- 環境問題とエネルギー問題を同時に解決する可能性を有する核融合エネルギーは、長期的な将来のエネルギー源の選択肢の一つ。
- ITER計画は、実験炉 ITERの建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証する国際プロジェクト。

●ITER協定 2007年10月24日発効

●経緯

1985年 米ソ首脳会談で核融合の国際共同開発に合意

1988年～2001年 概念設計活動・工学設計活動

2001年～2006年 政府間協議(2005年サイト決定)

2007年 ITER協定発効、ITER機構設立

●参加国 日、欧、米、露、中、韓、印

●建設地 フランス・カダラッシュ

●各極の分担(建設期)

欧州、日本、米国、韓国、中国、ロシア、インド
45.5% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1%

※ 各極が分担する機器を調達・製造して持ち寄り、ITER機構が全体を組み立てる仕組み



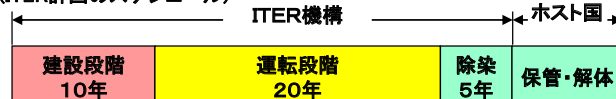
●計画 35年間

運転開始:2020年(予定)

核融合反応:2027年(予定)

●ITER機構長 本島修氏(2010年7月28日任命)

(ITER計画のスケジュール)



ベースライン設定
機器調達の本格化
サイト整備進展

ITER計画の位置づけ

試験装置の段階

(科学的実現性)

実験炉の段階

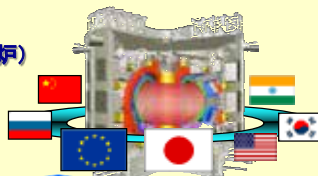
(科学的・技術的实现性)

原型炉の段階

(技術的実証・経済的実現性)

ITER計画
(国際熱核融合実験炉)

- ・50万kWの核融合エネルギー出力
- ・持続的な核融合燃焼の実証



ITERの効率的な運転に貢献

原型炉



- ・発電
- ・経済性見通し

実用化

超高温プラズマ
の実現

JT-60



幅広いアプローチ(BA)活動
2007年6月～ 10年間

- ・原型炉に向けた技術基盤の構築
- ・ITER運転シナリオの検討 等

【茨城那珂】

【青森 六ヶ所】



・サテライト・トカマク
(JT-60の超伝導化)

- ・国際核融合エネルギー研究センター
- ・国際核融合材料照射施設 工学実証・工学設計

ITERでは入手
できない原型炉
建設に必要なデータ
の取得

原型炉に必要な先進
的な材料開発やシ
ミュレーション研究等
を実施

ITERの鳥瞰図と主要諸元

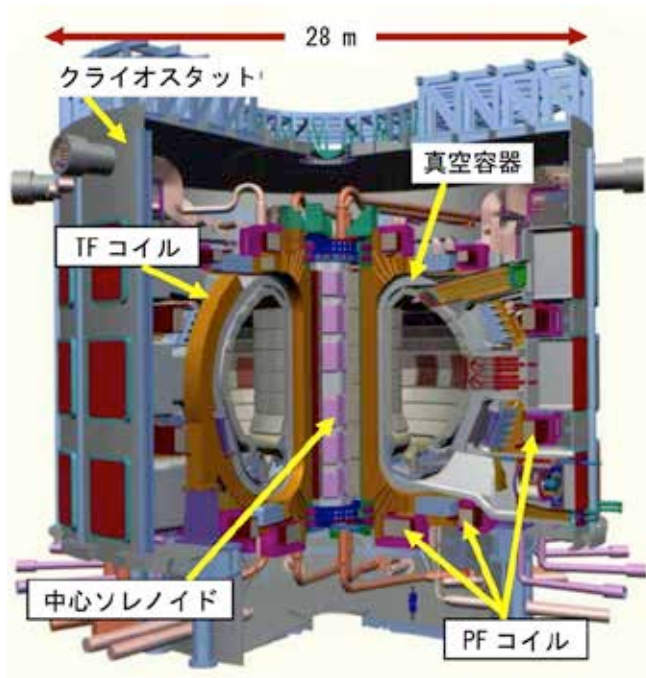


図1 ITERの超電導コイル・システム

表1 超電導コイルの主要諸元

	TF	CS	PF
コイル数	18	6	6
最高磁場(T)	11.8	13	6
最大運転電流値(kA)	68	40	45
運転モード	DC	パルス	パルス
超電導材料	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	NbTi

表2 ITERの標準動作モードの主要パラメータ

全核融合パワー (P_f)	500 MW
全核融合パワー/外部加熱 パワー (Q)	10
平均中性子壁負荷	0.57 MW/m ²
燃焼連続時間	400 s
プラズマ大半径 (R)	6.2 m
プラズマ小半径 (a)	2 m
プラズマ電流 (I_p)	15 kA
非円形度	1.84
プラズマ体積	815 m ³
平均プラズマ密度 (n)	$1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
閉じ込め時間 (τ)	3.4 s
平均プラズマ温度 (T)	8.1 keV (0.9 億度)
平均核融合積 ($n \tau T$)	$3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$
トロイダル磁場 (B_t)	5.3 T
規格化ベータ (β_N)	2

超伝導コイル・システムと日本調達分担

トロイダル磁場 (TF) コイル (周方向に18個配置)

- コイル19個(1個予備)のうち
 - TF導体: 全体の25%
 - TFコイル構造物: 100%
 - TFコイル巻線: 9個分
 - 構造物と巻線一体化: 9個分

直流運転、
11.8T、68kA、
Nb₃Sn導体

中心 (CS) ソレノイド (同じ大きさのコイル6個を積重ねた構造)

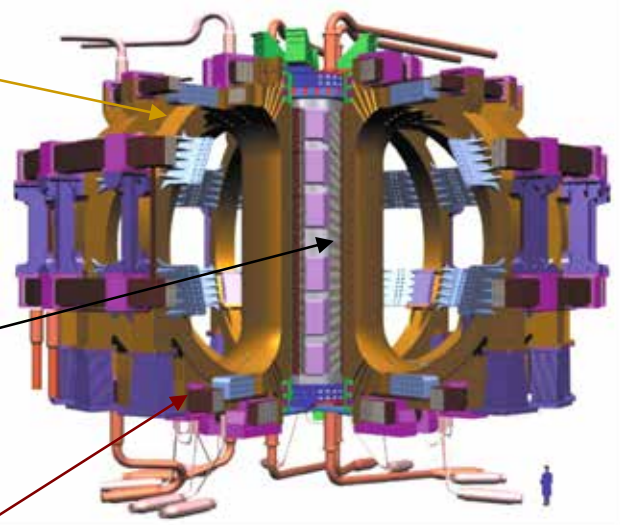
- コイル7個(1個は予備)のうち
 - CS導体: 100%
 - CSコイル巻線は米国が担当

パルス運転、
13.5T、42kA、
Nb₃Sn導体

ポロイダル磁場 (PF) コイル (TFコイルの外側に6個配置)

- EU、ロシア、中国が担当
- 日本は調達分担しない

パルス運転
6T、45kA
NbTi導体



コイル・システム総重量	10,000トン
Nb ₃ Sn素線重量	550トン
NbTi素線重量	250トン
TFコイル容器重量	3,600トン

ITER建設スケジュール

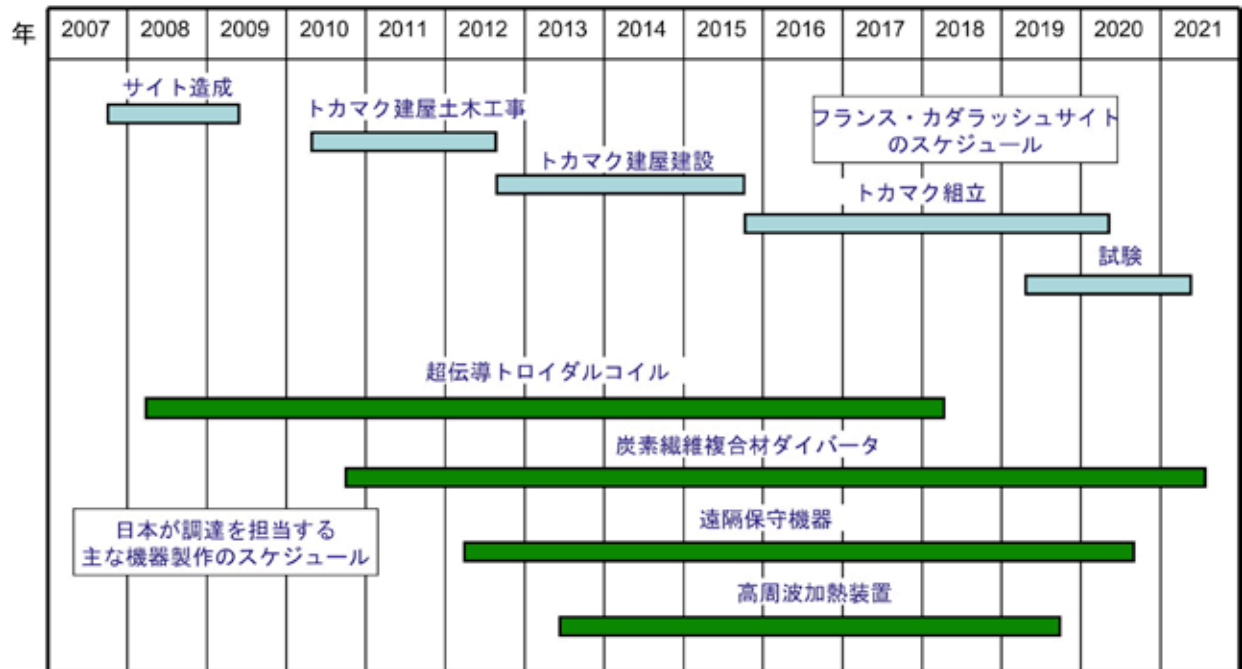
2007年10月24日

ITER協定発効

ITER機構設立 建設認可

トカマク組立開始

トカマク主要部 組立完了 ▼ 初プラズマ



「核融合炉」のまとめ

- ◆ 核分裂反応と核融合反応に伴うエネルギーの生成は、質量とエネルギーの等価性により理解できる。
 - 太陽内部も1種の核融合反応をしている。
- ◆ プラズマは、固体／液体／気体に続く第4の状態である。
- ◆ 超伝導コイルがつくる磁場によりプラズマを閉じ込める核融合発電の実現に向けた研究開発が進められている。
- ◆ 国際熱核融合実験炉(ITER)計画
 - 7極(日、欧、米、露、中、韓、印)が参加するプロジェクト
 - ITER協定が2007年10月に発効
 - 実験炉をフランス・カダラッシュに建設
 - 2020年に運転開始(予定)
 - 2027年に核融合反応(予定)