

2009年3月2日最終講義

スピン偏極電子源の開発と
応用分野の開拓

SP研 中西 彊

“はなし”のスタイル

- 個人的な思い入れを聞いていただくことをお許してください。
- スマートでなく、泥臭く。
- 建前ではなく、本音で。
(ひとを不快にしない範囲で？ 控え目に？)
- “スピン偏極電子源”がライフワークとなる
- 好きなテーマの研究が続けられる条件
 - ① ひと(共同研究者)
 - ② 装置をつくる資金
 - ③ 実験場所
 - ④ 自分の身分

の確保

“スピン実験”へのこだわり(芽生え)

京大4回生(1967)時代の恩師 西村奎吾先生

1) 核力のスピン依存性研究(@原子核研究所)

“日本は貧しいから今すぐにエネルギーフロンティアは無理、別の得意技(例えばスピン制御)で勝負すべきだ”

2) 自主的にテーマを考えた4年生実験

“ポジトロニウムの γ 線消滅”

- 物質からエネルギーへの転化
- ◎ 手作りした実験装置が働いたという充実感と自信
- テーマ自身の面白さ

陽電子を用いる物性実験のさきがけ? → PETでの実用化

研究人生(を2つに区切ると)

I スピン偏極核子ターゲットの時代

修士(1968)～助手(1983)

博士論文

○原子核研究所(55MeV陽子→**1.2GeV電子ビーム**)

○KEK(12GeV陽子ビーム+2次の π /Kビーム)

◆ 手作りの**クライオスタット**(ヘリウム4→3→希釈)

◆ 手作りの**NMR**装置(偏極度測定)

II スピン偏極電子ビーム源の時代

助手(1984)～助教授(1987)～教授(1995)～現在(2009)

◆ 手作りの**4keV**偏極電子源

◆ 手作りの**70keV**偏極電子源

◆ 手作りの**200keV**偏極電子源

◆ 手作りの電子顕微鏡用**20keV**偏極電子源(2台+1台)

25年間!!

なぜ、スピン偏極電子源を始めたか？

(1) 偏極ターゲットのみの実験に限界を感じた



(1970年代にコライダー時代の幕開け)

(2) 偏極ビームとの併用を模索(1980年代前半)



(KEK偏極陽子ビーム加速と実験→発展できず)

(3) SLC実験(1978)からのインパクト

(Z_0 交換相互作用のパリティの破れ)

- ◆ 標準理論の最初の定量的検証→ノーベル賞)
- ◆ 小早川先輩のadvice (GaAs型偏極電子源)

スピン偏極電子ビームの 開発目標でプロジェクトを分けると、

(I) リニアコライダー

1990~

実証機は完成

(2) 第4世代放射光源

2000~

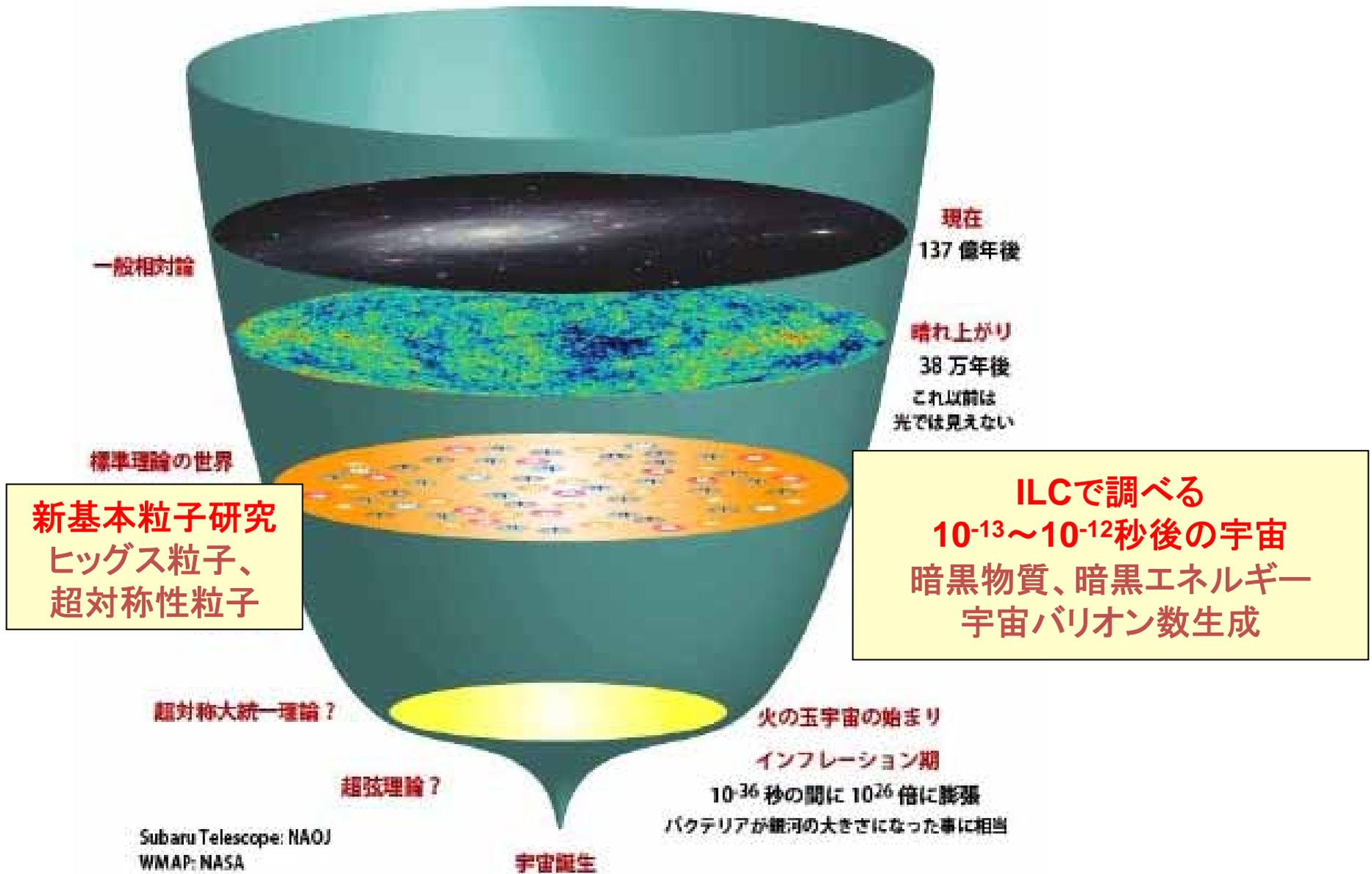
技術開発中

(3) スピン電子顕微鏡

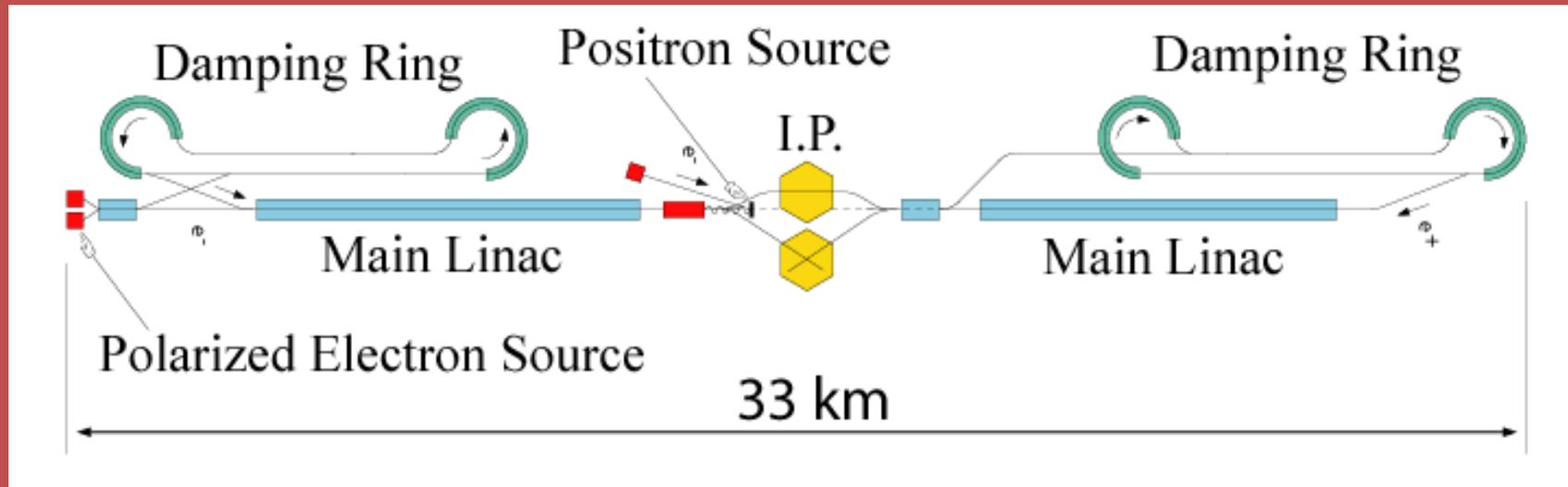
2004~

実用化が目前

宇宙創成の謎に迫るILCリニアコライダー



世界最先端の電子ビーム加速器建設計画 International Linear Collider (ILC)



重心エネルギー : 0.5 ~ 1 TeV

衝突点での
ビームの大きさ $\sigma_x: 550\text{nm}$
 $\sigma_y: 5\text{nm}$

→ $L \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



超伝導空洞

→ 全部で 21,000 unit

第4世代の放射光源加速器の建設計画

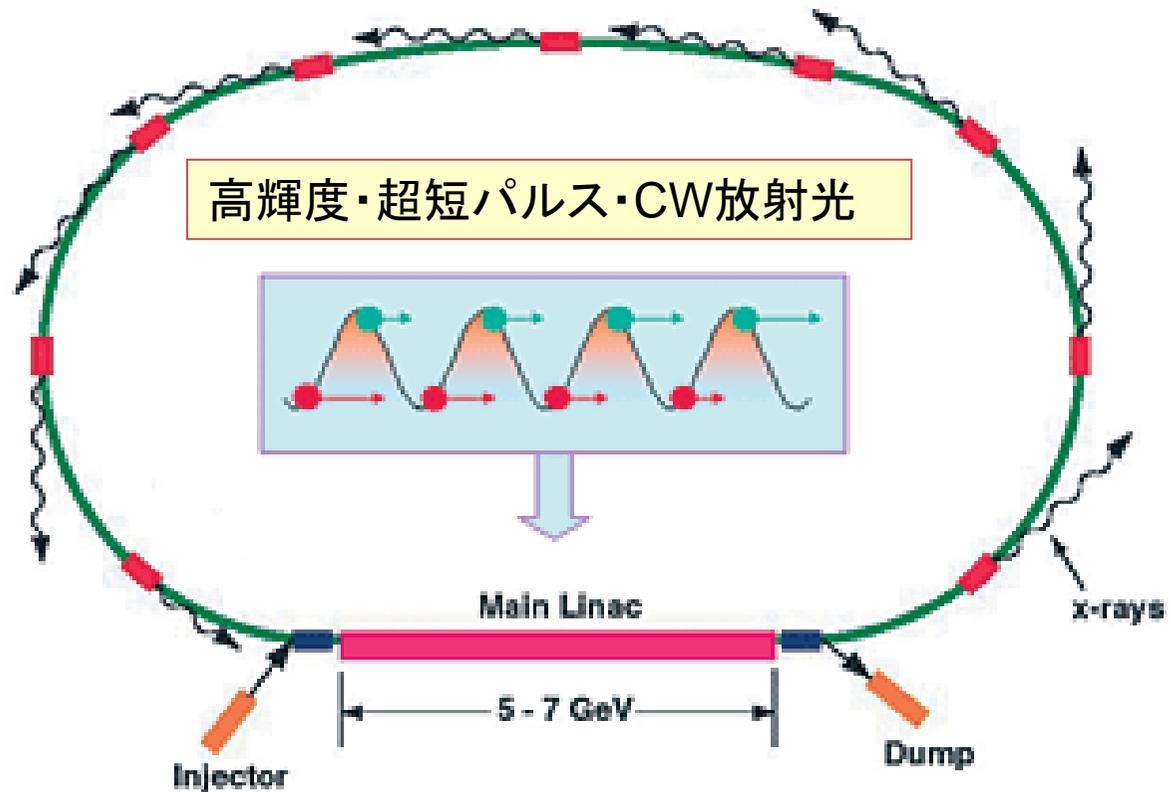
ERL (Energy Recovery Linac) 加速器

- ビームエネルギー 2.5~5.0 GeV
- パルス長 1 ps~100 fs
- 挿入光源: 5m級~20本、30m級~4本、
- スペクトル範囲 軟X線から硬X線まで
- 光輝度: 従来の蓄積リング型より3桁高い
- 平均電流: (10~100) mA
- 波長 0.1 nm (~12 keV) で、平均輝度: $10E+22$ (ph/sec/0.1%/mm²/mrad²)
- 平均フラックス: $10E+16$ (ph/sec/0.1%)

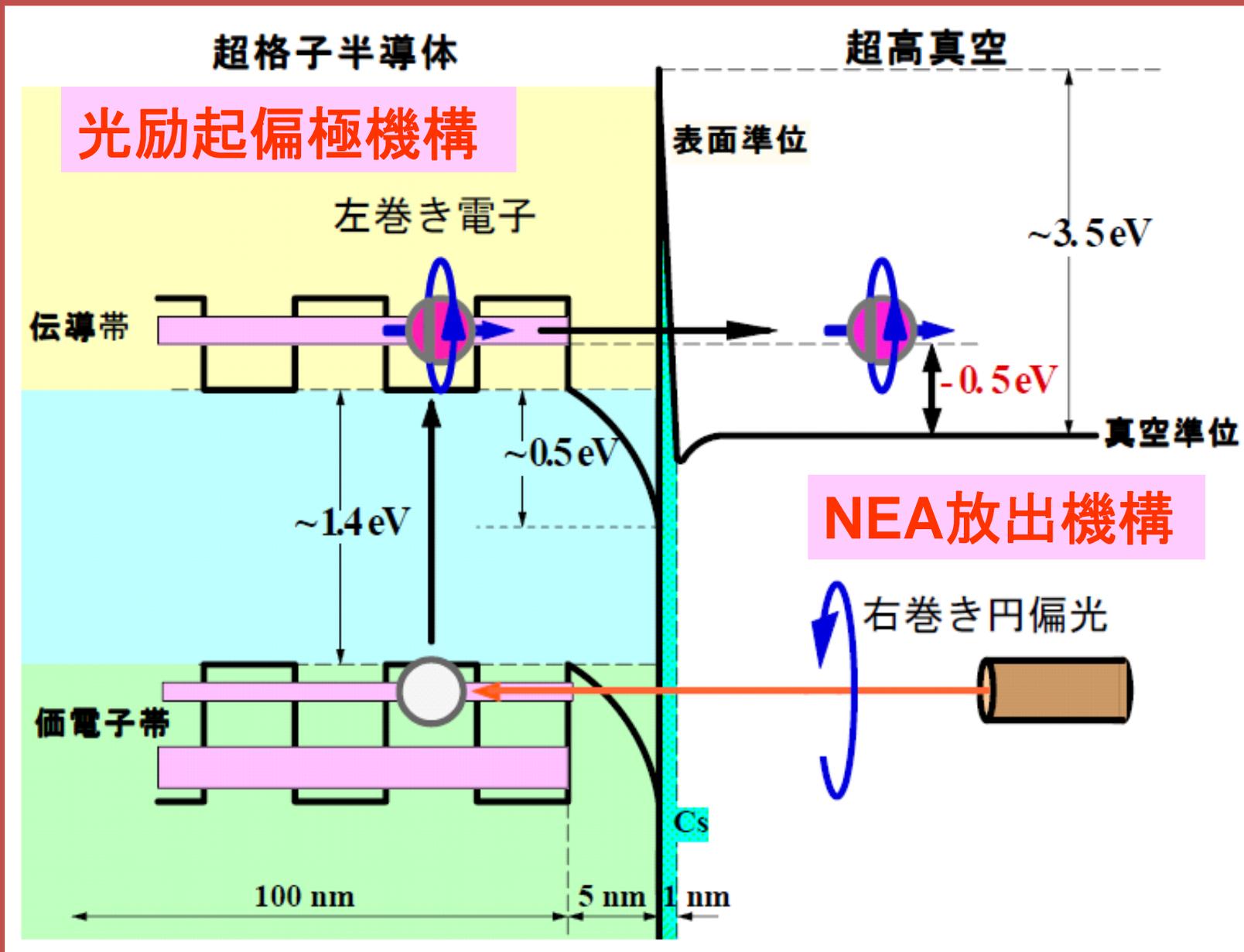
技術的課題

- (1) 超低エミッタンス電子源
- (2) 100%に近いエネルギー回収のための超伝導空洞加速技術

ERL推進室(KEK)
500keV電子銃
の試作スタート!!!

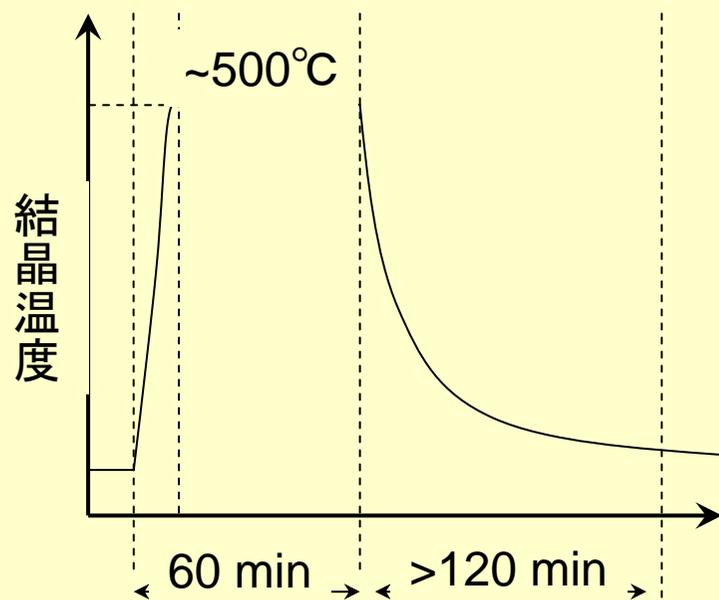


GaAs型 スピン偏極電子源の原理



活性化ChamberにおけるNEA表面の形成

ヒートクリーニング処理の過程

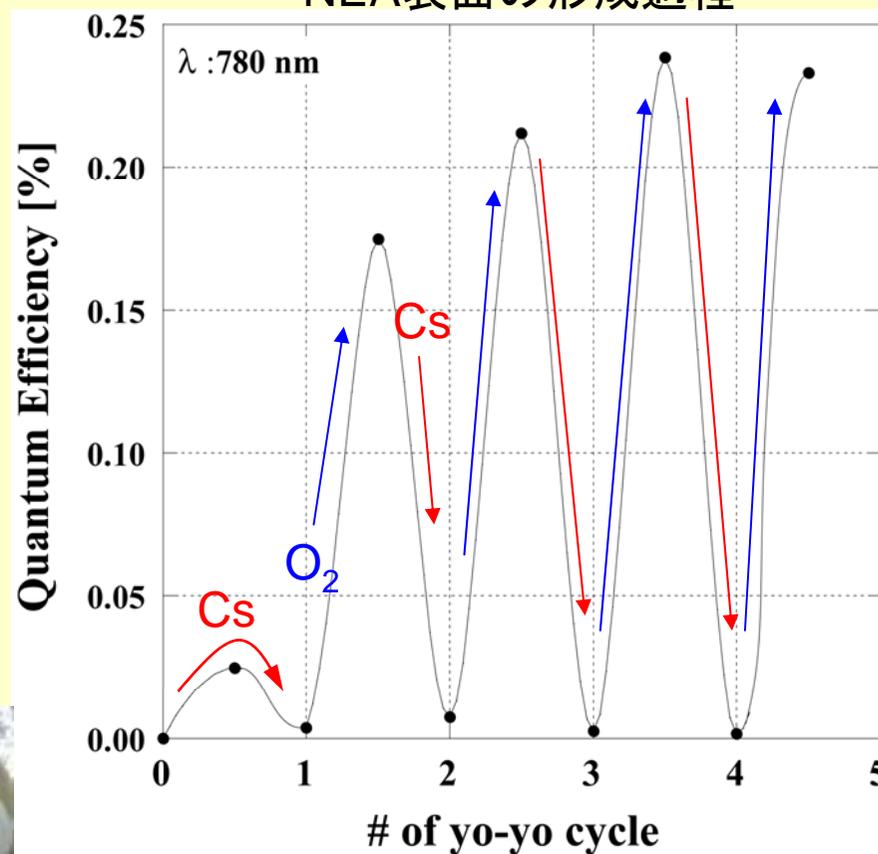


ヒートクリーニングの様子



Cs源

NEA表面の形成過程



サンプル: $\phi 23\text{mm}$ 丸型GaAs-GaAsP歪み超格子

量子効率0.23% (励起波長780nm)

NEA表面形成後はすぐに電子銃へ移送

最初の3年間(1982~1985)

“種から芽を出させる“ために一番情報集めに動いた時代

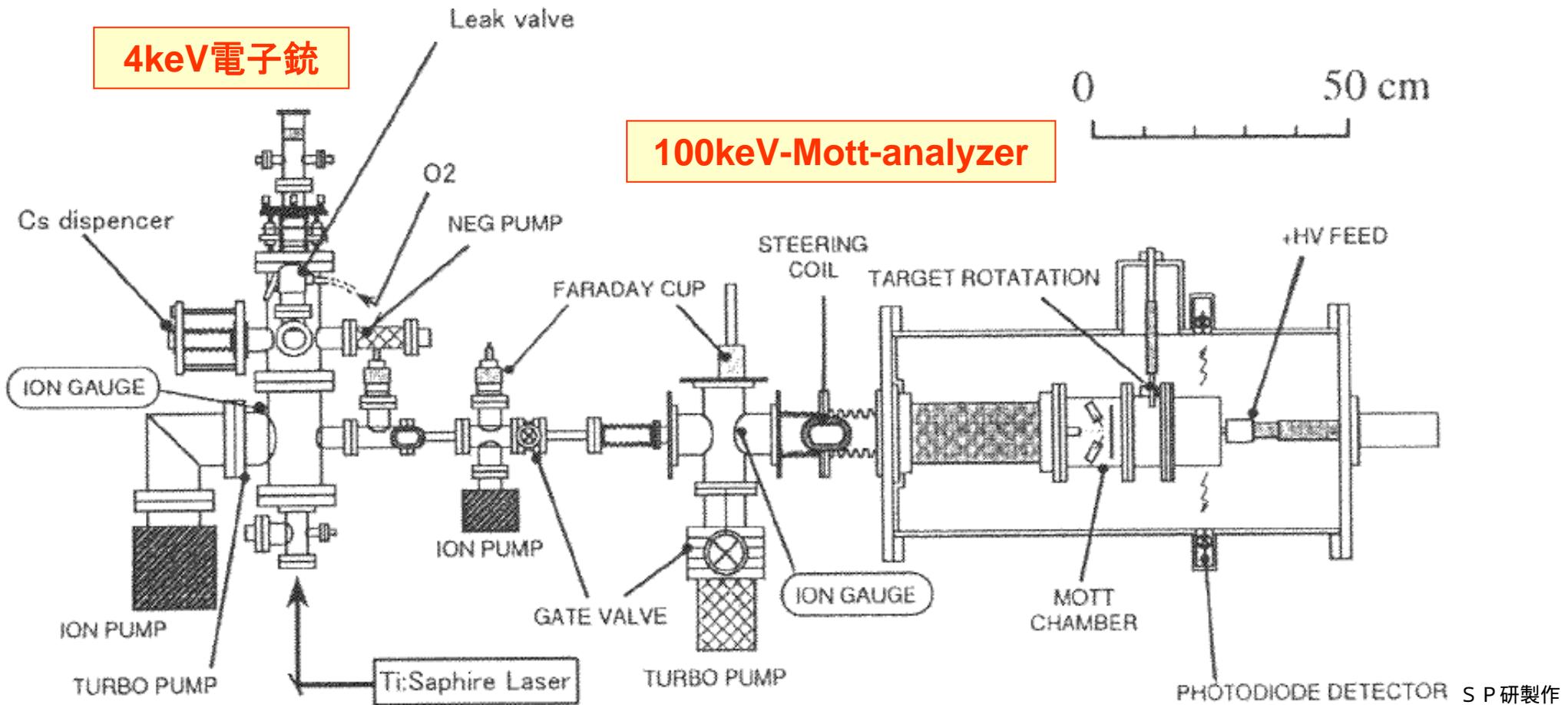
(1) 基本技術についての勉強と情報集め

- ①GaAs型偏極電子源-----J. Pierceらの原論文、小早川さん(名大)
- ②熱電子銃など-----神谷芳弘先生(名大)
- ③NEA表面作成-----助川徳三先生(静岡大)
- ④カルコパイライト結晶-----堀中博道さん(大阪府大)

(2) 4keVの試作第1号機(NPES-1)

- ◆最初の資金-----科研費B(1982) 820万円
- ◆倉田奨励金-----日立・委任経理金 280万円
- ◆最初の論文
 - “名古屋大学における偏極電子源の開発(I)”, 原子核研究30巻(1986)
 - “The Construction of GaAs Spin Polarized Electron Source and the Measurement of the Electron Polarization”
Japan. Jour. Appl. Phys. 25 (1986) 766-767
- ◆最初のトラブル-----スピン偏極度が10%しかない!!

NPES-1 (4keV) の製作



先達の原理証明から10年遅れで完成したが、
まだ、やる価値のある課題が残っていたのが幸い

高い偏極度を模索した時代(1985~2002)

◎ “GaAsのΓ点で重い正孔と軽い正孔の縮退を解く”3つの候補

- ① カルコパイライト(三元半導体)
- ② GaAsを歪ませる
- ③ 超格子構造の利用

◆ 最有望視されたカルコパイライトを求めて堀中さんにコンタクト

○ フンボルト留学生(1985から1年4ヶ月)時代に転機

◆ カルコパイライトの単結晶は簡単にはできない
(Zuerich-ETH) (Juerich-KFA) (Konstanz-Univ)

◎ 歪みGaAs薄膜へ方向転換

◆ SLACの失敗(1982)-----GaAsに外部圧力を印加

◆ PESP-1988(ミネアポリス)

“格子不整合で歪ませるidea“が有望と発表

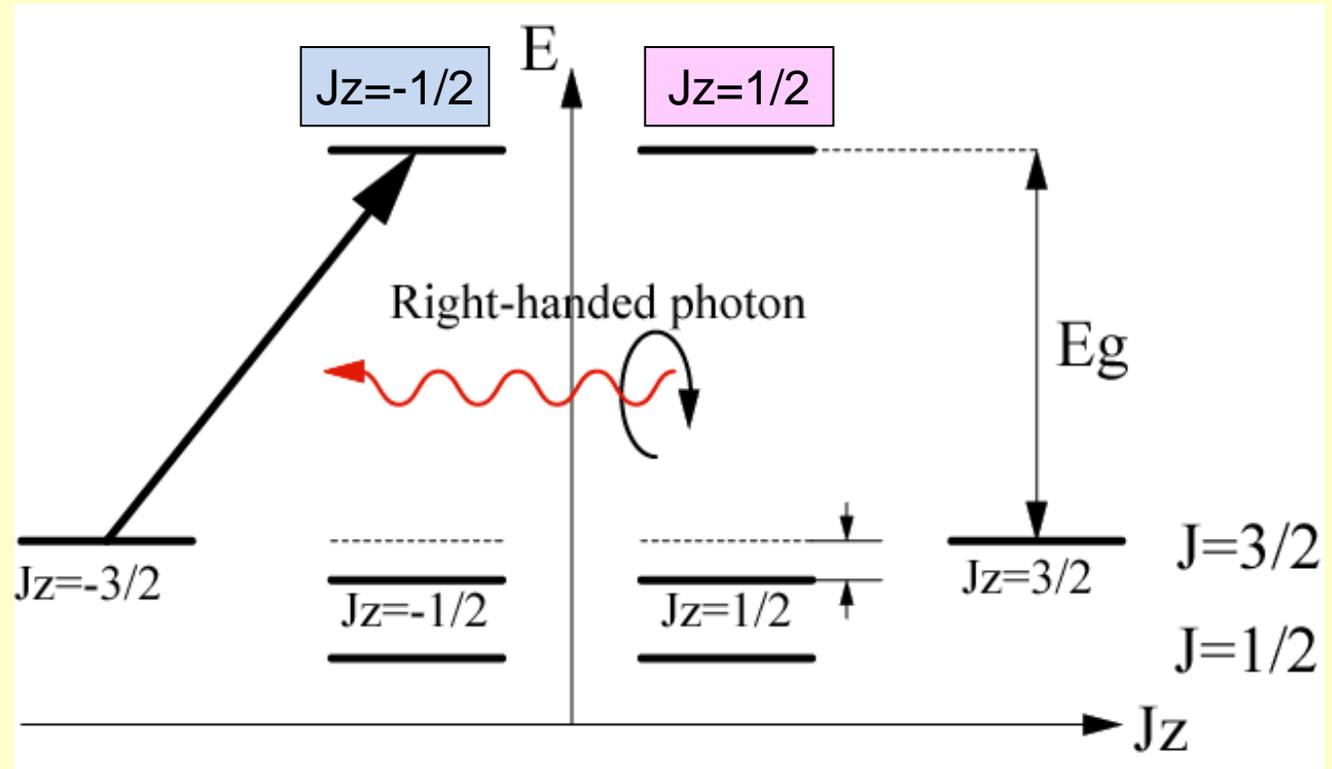
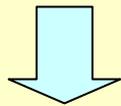
◆ 具体的に(無償で)結晶を作ってくれるひとを探す試みを開始
名大(工)、名工大、浜フォトなどで断られる-----2年間を浪費

◆ 堀中さんの仲介で、
大同特殊鋼の坂貴さん、加藤俊宏さんに出会う

最初の結晶で52%、2番目の結晶で86%

高い偏極度の実現方法

バルクGaAs



Energy-band-structure @ Γ point

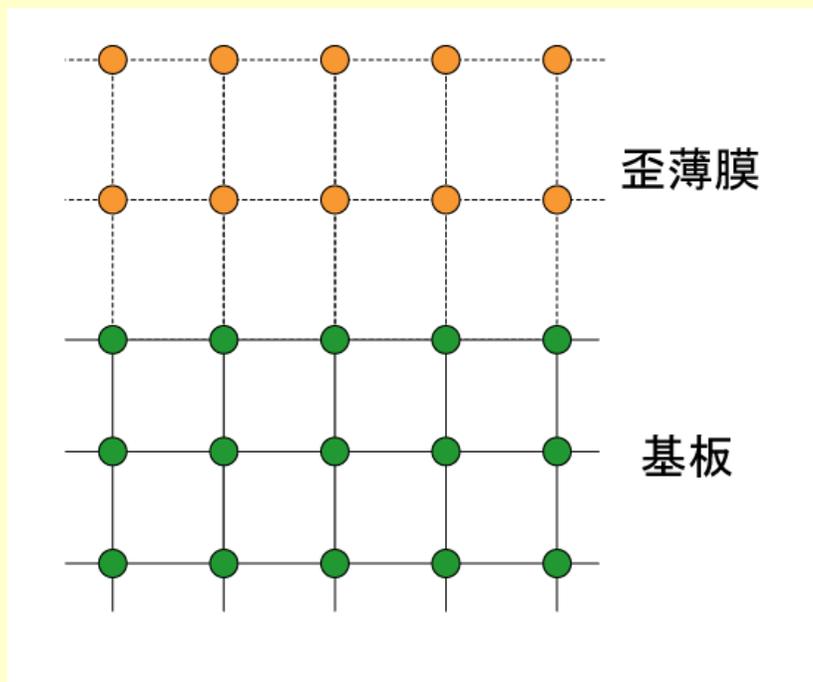
1) **歪みGaAs,**

または、

2) **超格子構造**

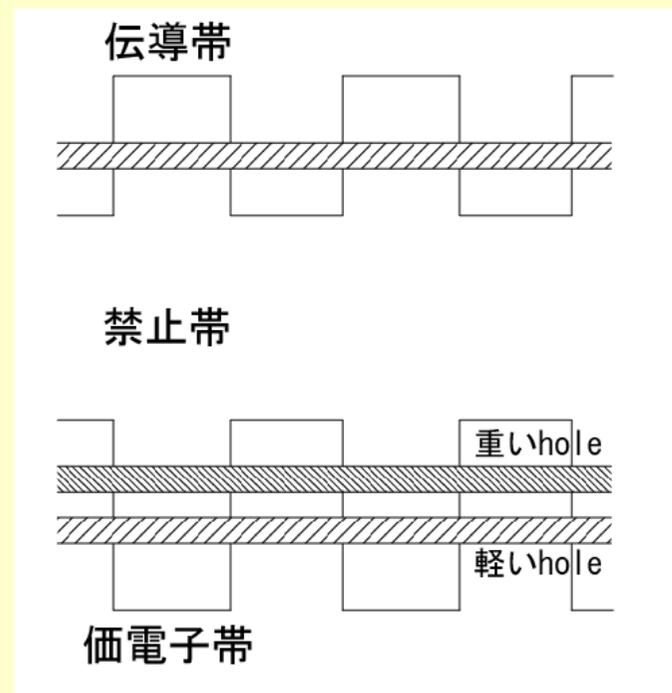
$$\text{スピン偏極度} = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} > 50\%$$

価電子帯の縮退を解く2つの方法



歪薄膜

$$H_{\varepsilon} = A \cdot \varepsilon + \underline{B \cdot \varepsilon \cdot \{(L_z)^2 - L^2/3\}}$$

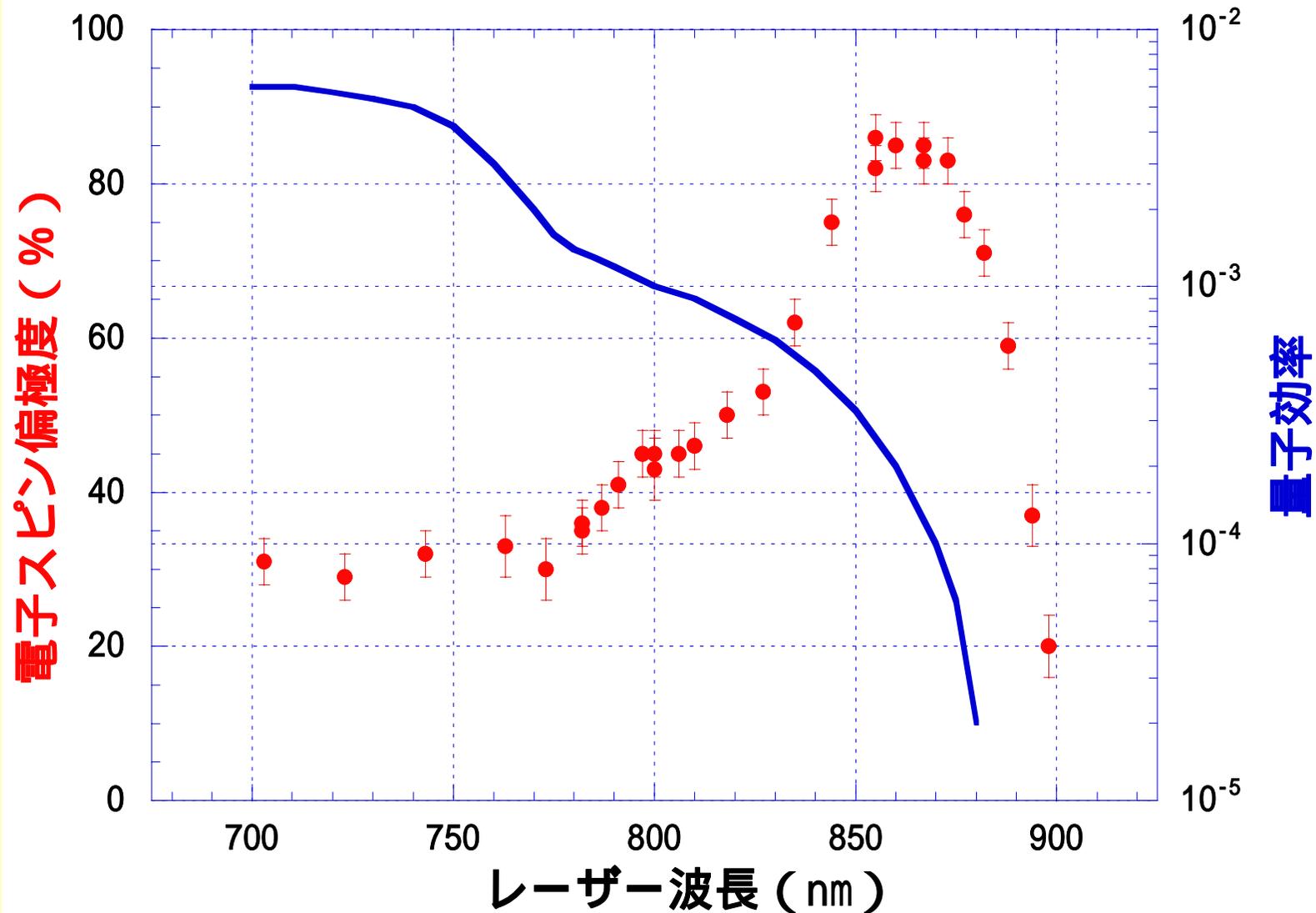


超格子構造

$$m_{|J_z|=3/2}^* > m_{|J_z|=1/2}^*$$

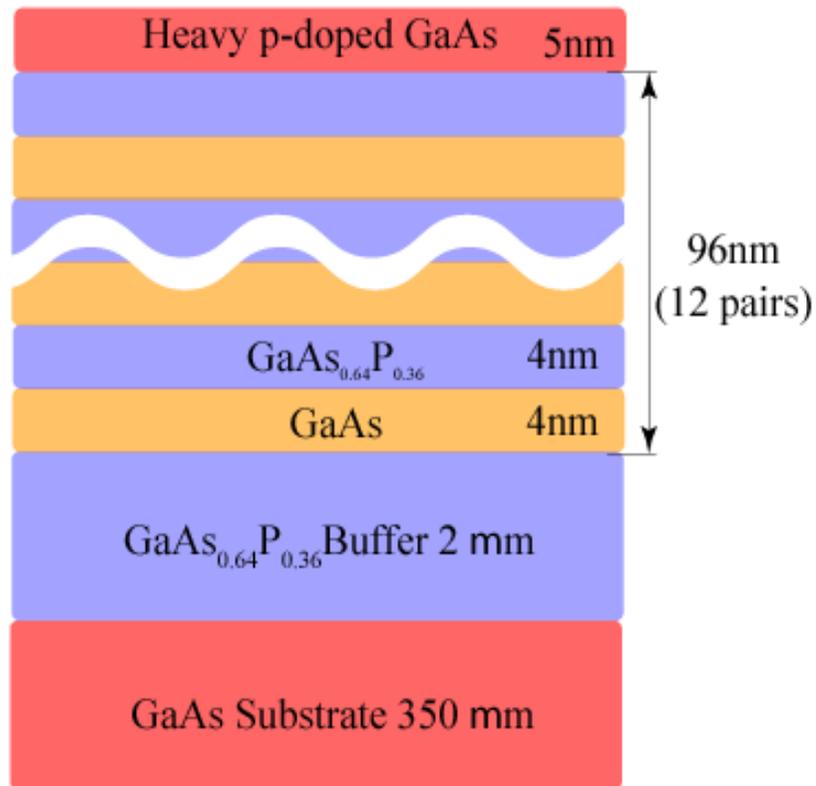
1991年にブレイクスルー、86%の偏極度を一気に達成

名大-大阪府大-大同特殊鋼



GaAs-GaAsP超格子 (1998~)

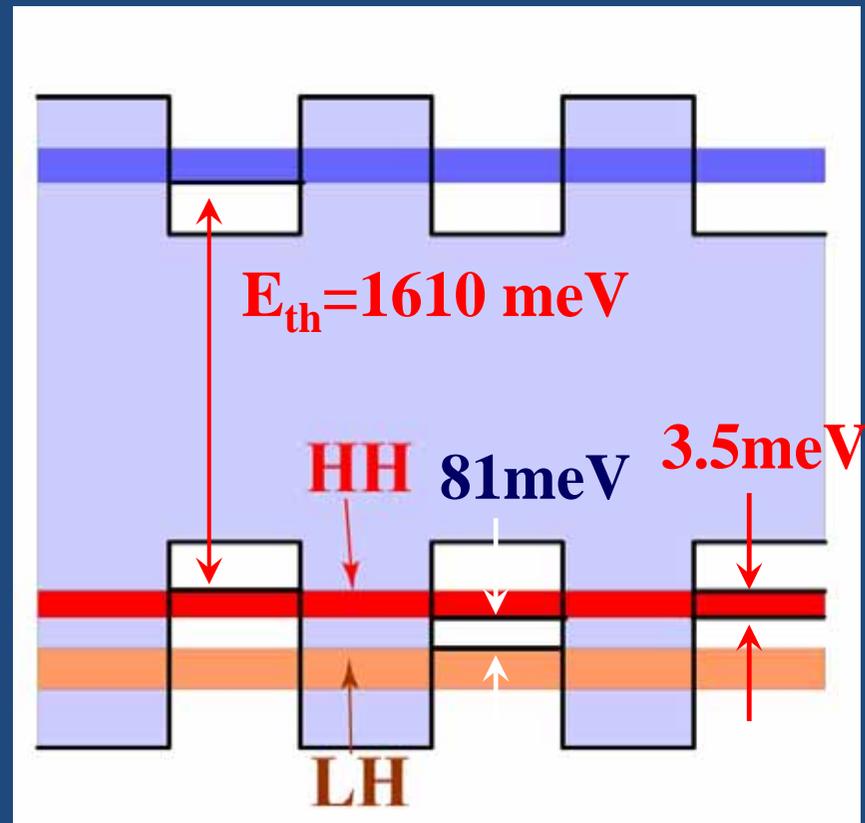
結晶構造とエネルギー・ミニバンド構造



GaAs-GaAsP超格子薄膜の結晶構造

井戸層 (GaAs) 4nm

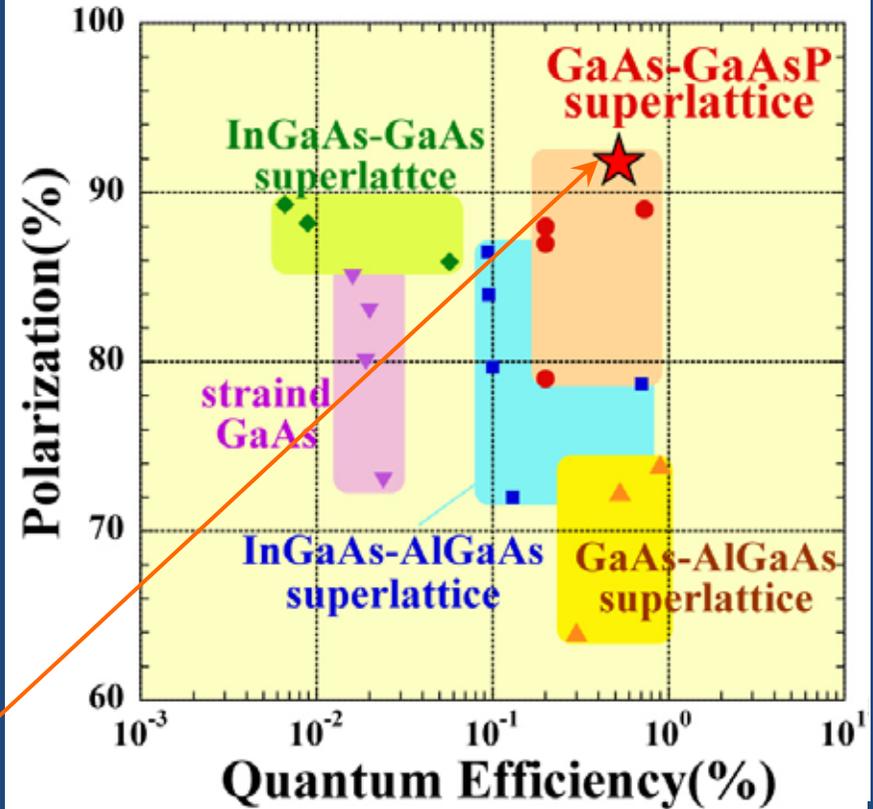
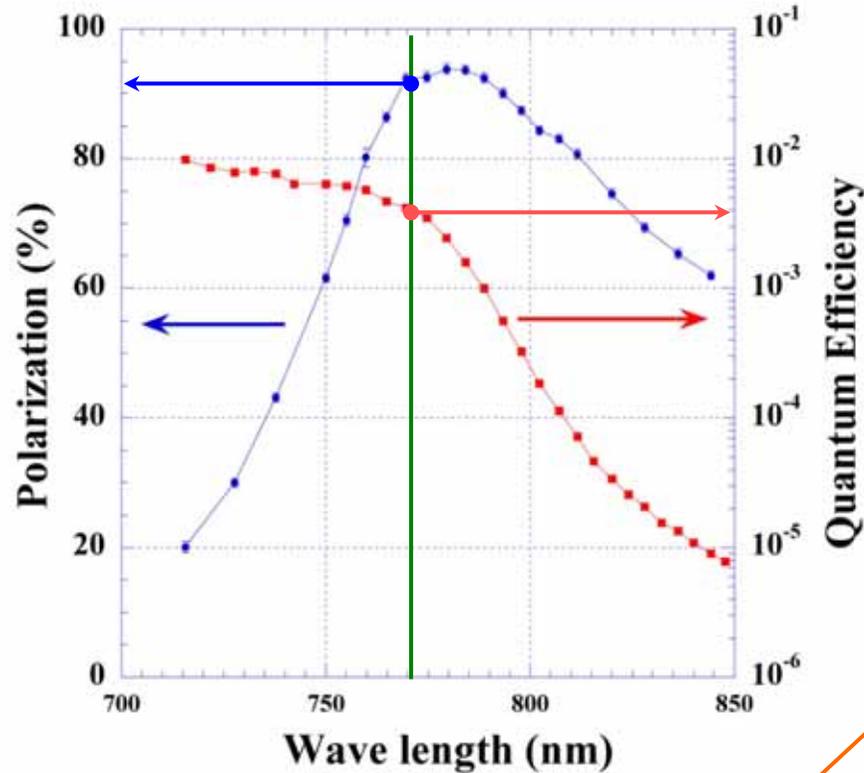
障壁層 (GaAsP) 4nm



重い正孔 (HH)と軽い正孔 (LH)の
エネルギー分離

$\delta \sim 80 \text{ meV}$

GaAs-GaAsP 超格子などによる高性能化



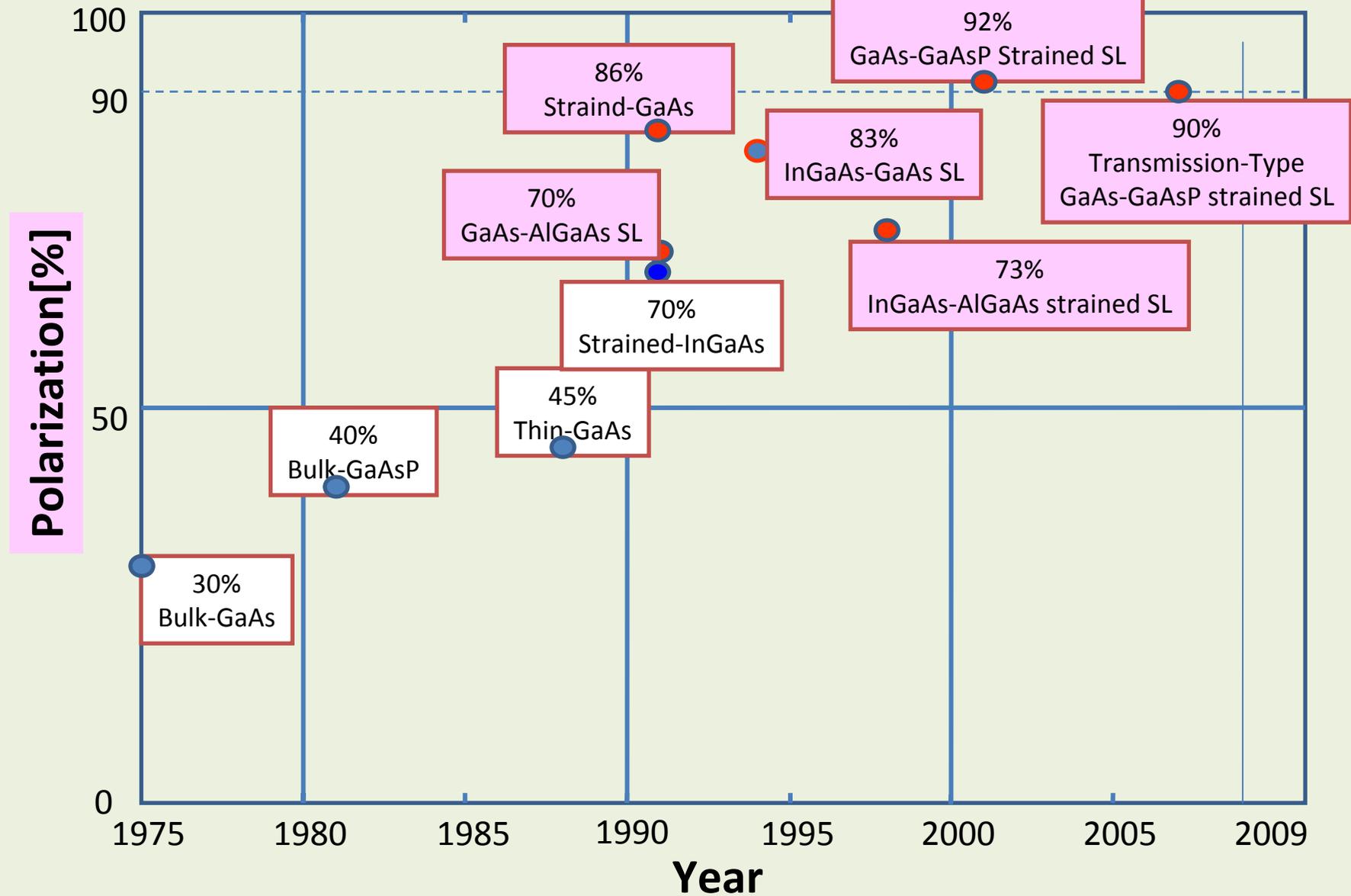
レーザー波長@778nm

スピン偏極度 ~ 90%
量子効率 ~ 0.5%

現時点では、GaAs-GaAsP 超格子
がベストの性能

Spin Polarization Improvements

by our works



高エネルギー加速器用偏極電子源の開発へ

100keV電子銃(1992→1997)

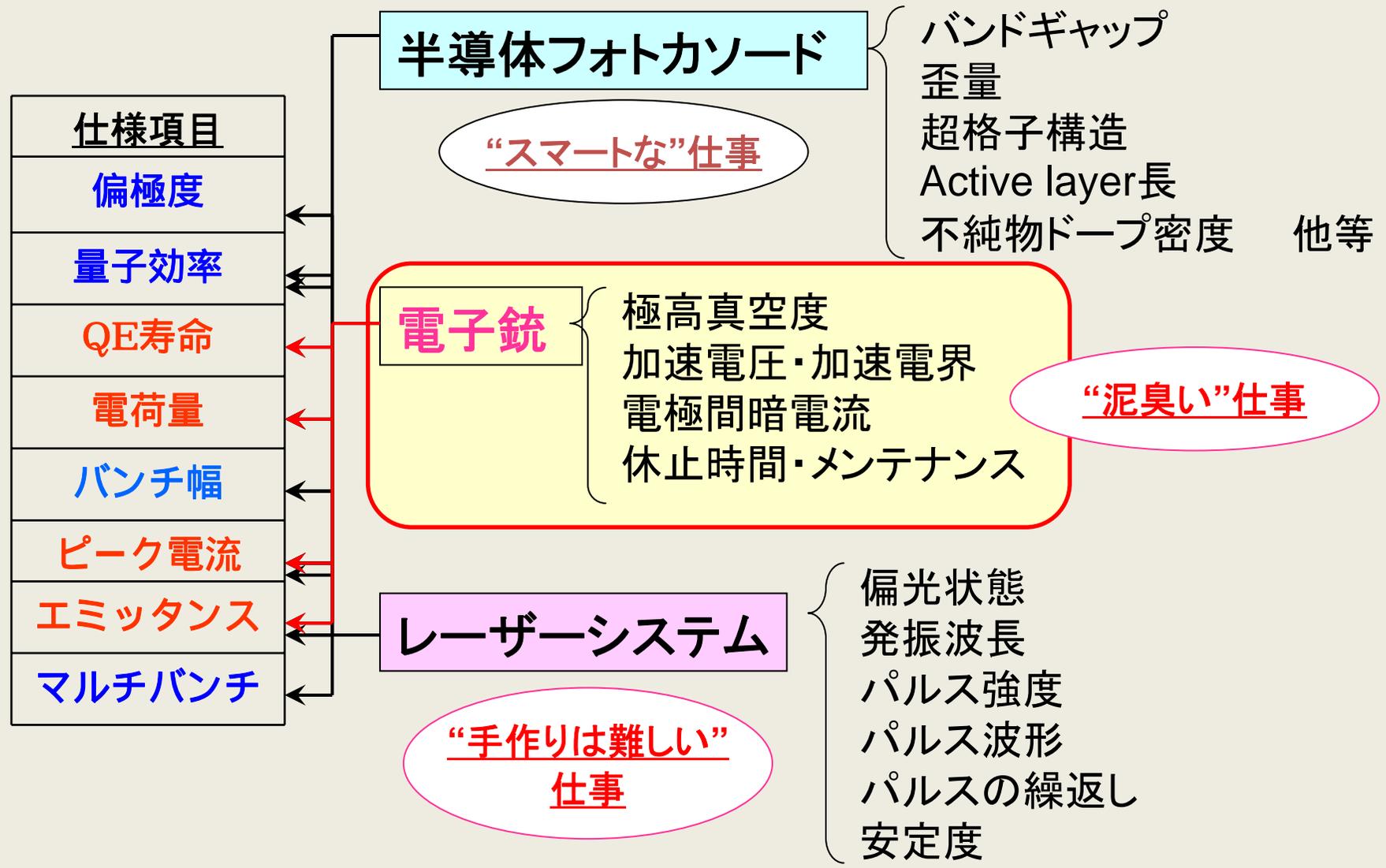
- 設計→製作→完成→成果まで、5年間
- サブナノ秒マルチバンチビーム生成
(表面電荷制限現象の克服方法の確立)



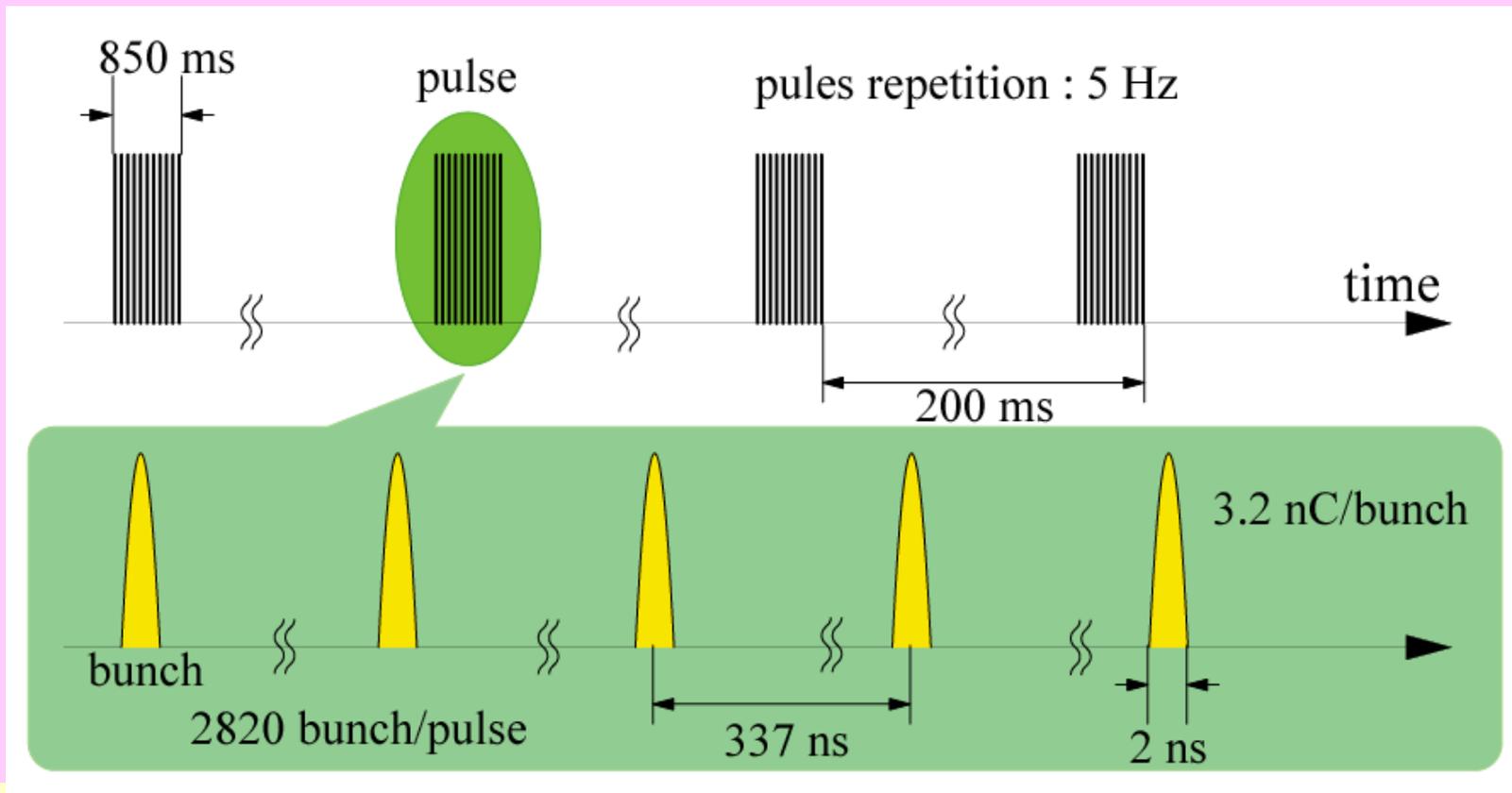
200keV電子銃(1998～2009)

- 設計→製作→完成→成果まで、10年間
- リニアコライダーの要求をすべて満たす実証機としての完成
NEA表面を守る技術への挑戦
(暗電流抑制技術の確立)
(極高真空技術の部分的確立)

スピン偏極電子源3つの構成要素



Multi-bunch Structure Beam for ILC



- **Multi-bunch Structure**

$$3.2 \text{ nC} \times 2820 \text{ bunch} \times 5 \text{ Hz} = 45 \mu\text{A}$$

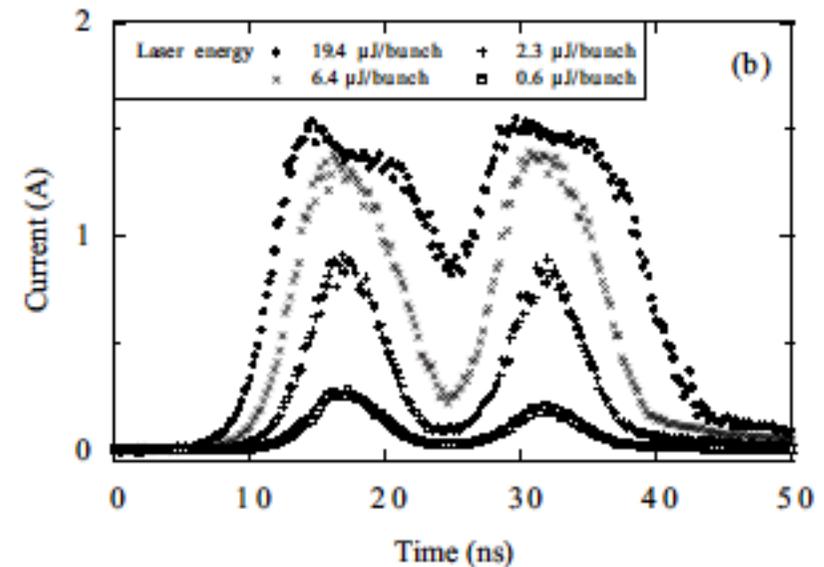
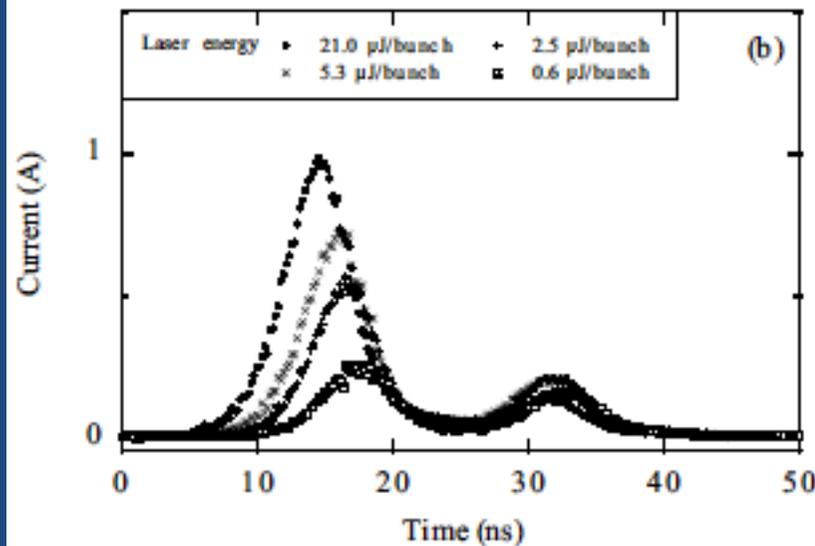
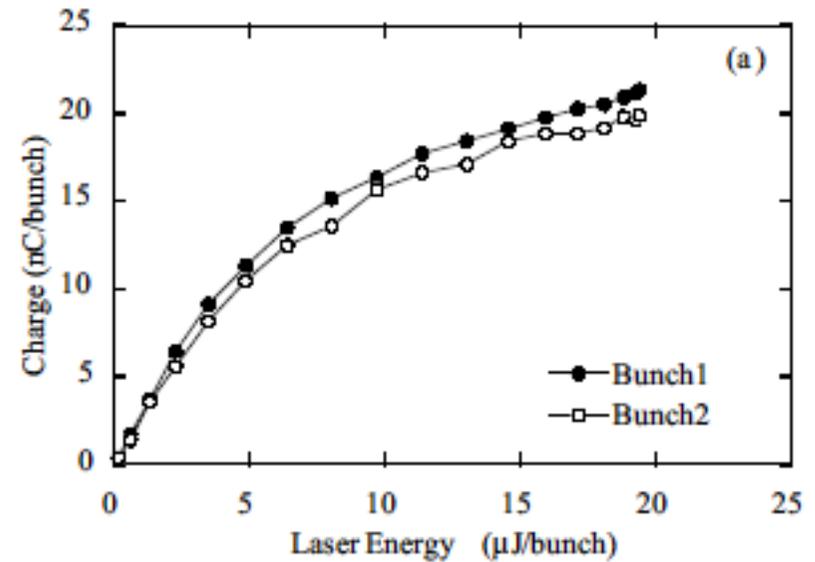
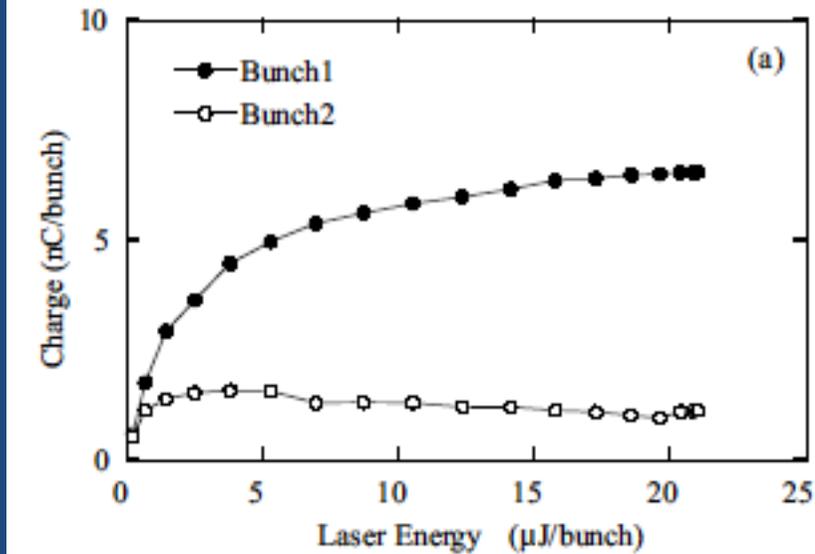
**Average
current**

- **Peak Current**

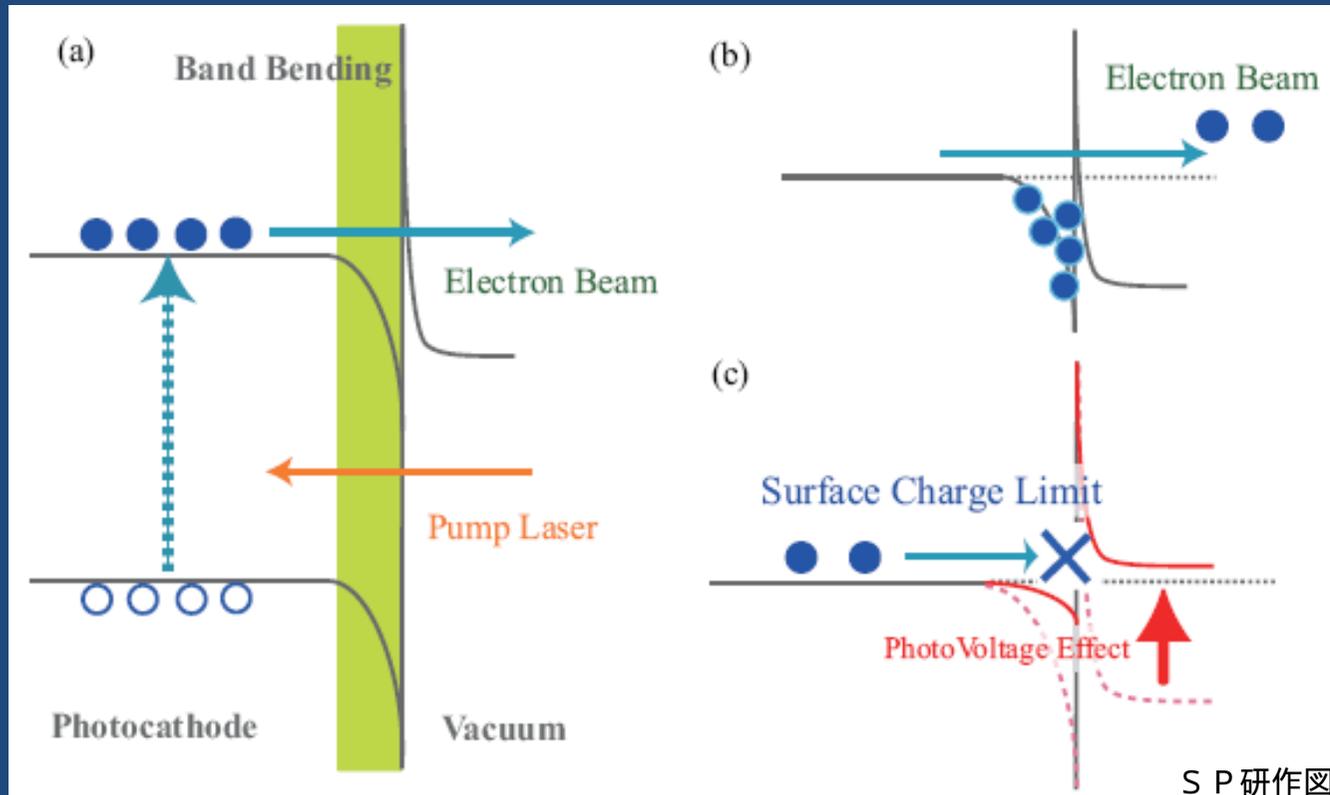
$$3.2 \text{ nC} / 2 \text{ ns} \sim 1.6 \text{ A}$$

Surface Charge Limit Problem solved by using SL Photocathode

K. Togawa et al. N.I.M. A414 (1998) 31-45

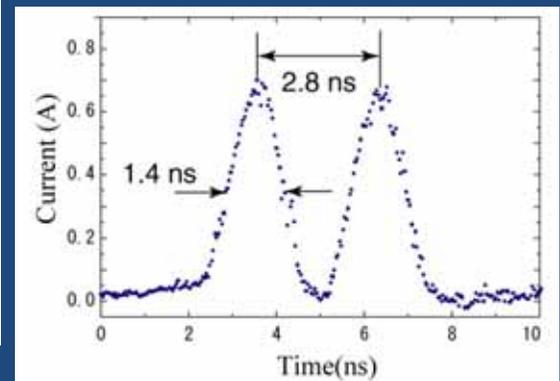


Mechanism and solution of Surface Charge Limit phenomenon



○ 電子を溜めない
high QE \Rightarrow 超格子

○ 電子を速く消滅させる
High P-dope at surface
 \Rightarrow band bending領域を狭くする



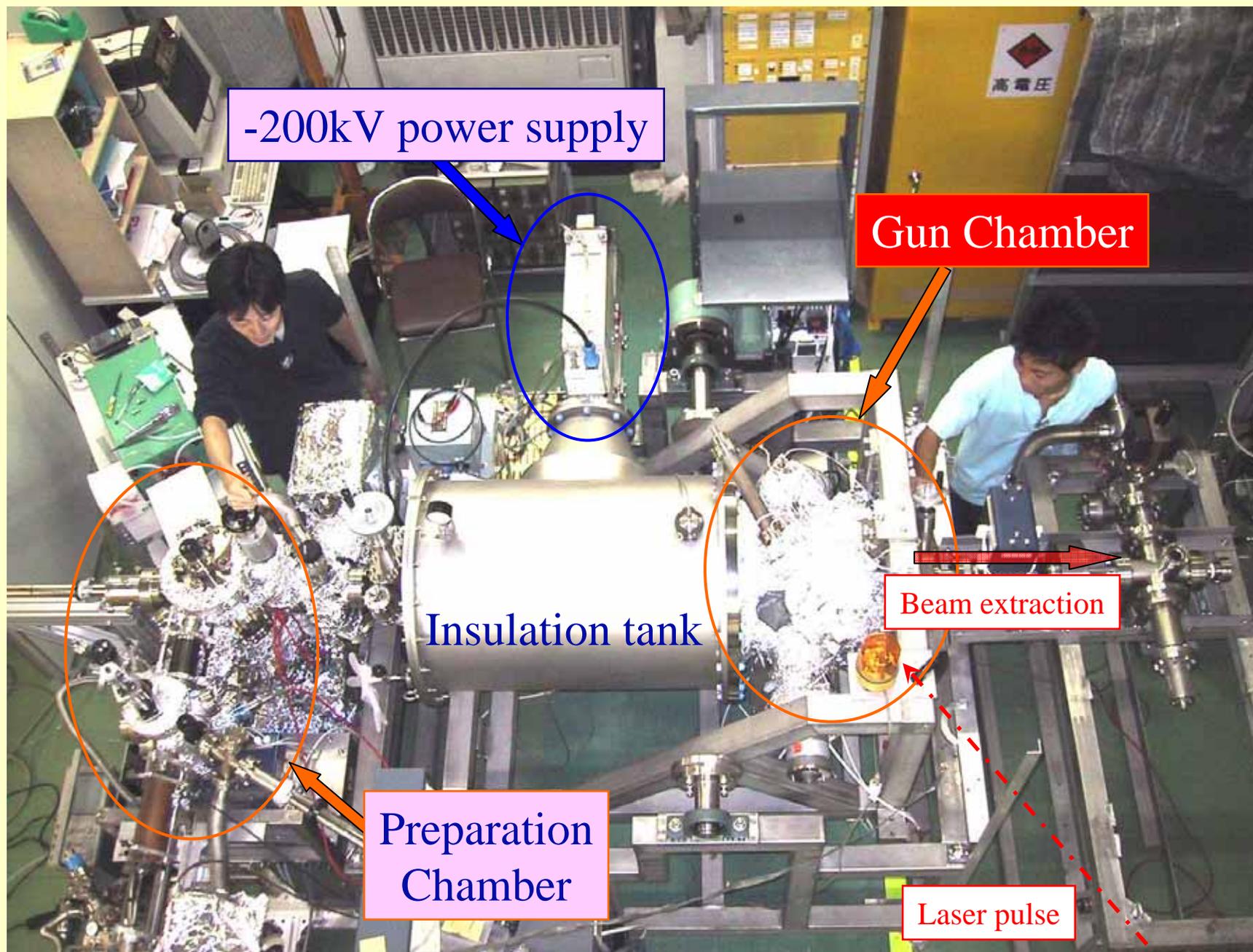
渡川和晃 第1回高エネルギー物理学奨励賞(1999)

200keVリニアコライダー用偏極電子源の実証機 (泥臭い仕事=既存技術の限界に挑む)

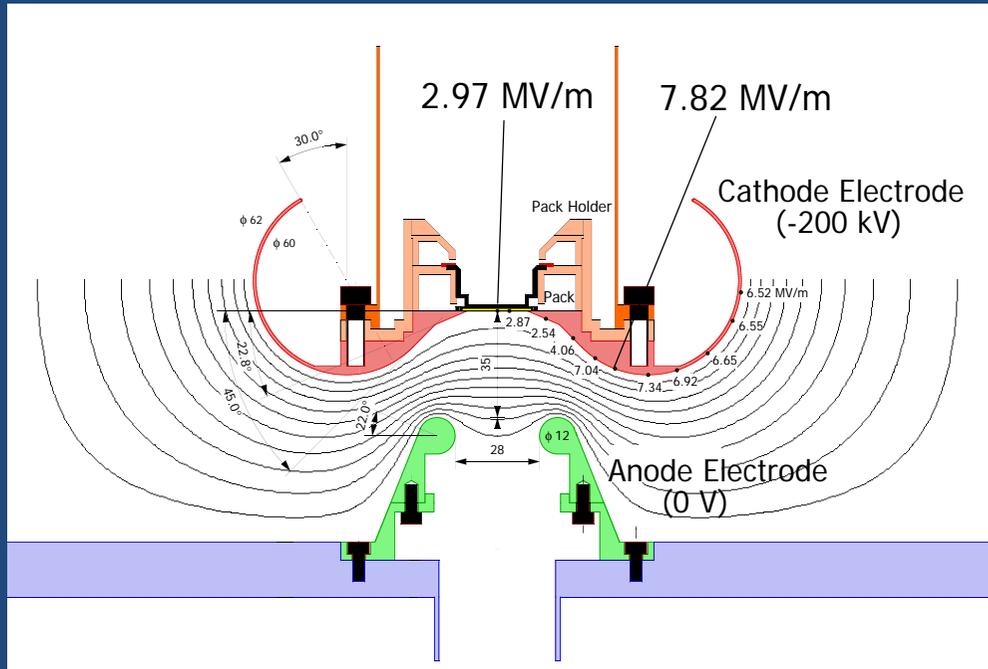
1998年設計開始

- それまでのベストは、SLACの120keV偏極電子銃
(SLCのW-S角精密測定実験で5年間の稼動実績)
- SLACを上回る性能を目指す
フォトカソード印加電界を1.8MV/mから3.0MV/mへ
 - 低エミッタンス化
 - 高ピーク電流密度化
 - 高移送効率化
- 新技術開発
 - ① 高電界化
 - ② 低暗電流化
 - ③ 極高真空度化

NEA電子放出機構を守る技術



Electrode Structure (NPES-3)



| | 200keV | SLC (120KeV) |
|--------------------|----------|--------------|
| PC Surface | 3.0 MV/m | 2 MV/m |
| Cathode surface | 7.8 MV/m | 7 MV/m |
| Space charge limit | 31.1 A | 20 A |

Elec. Material : **Clean-Z**
 Polishing : electro-buff
 polishing
 $R_y < 0.12 \mu m$

$I_{\text{dark}} < 1nA @ 200kV$

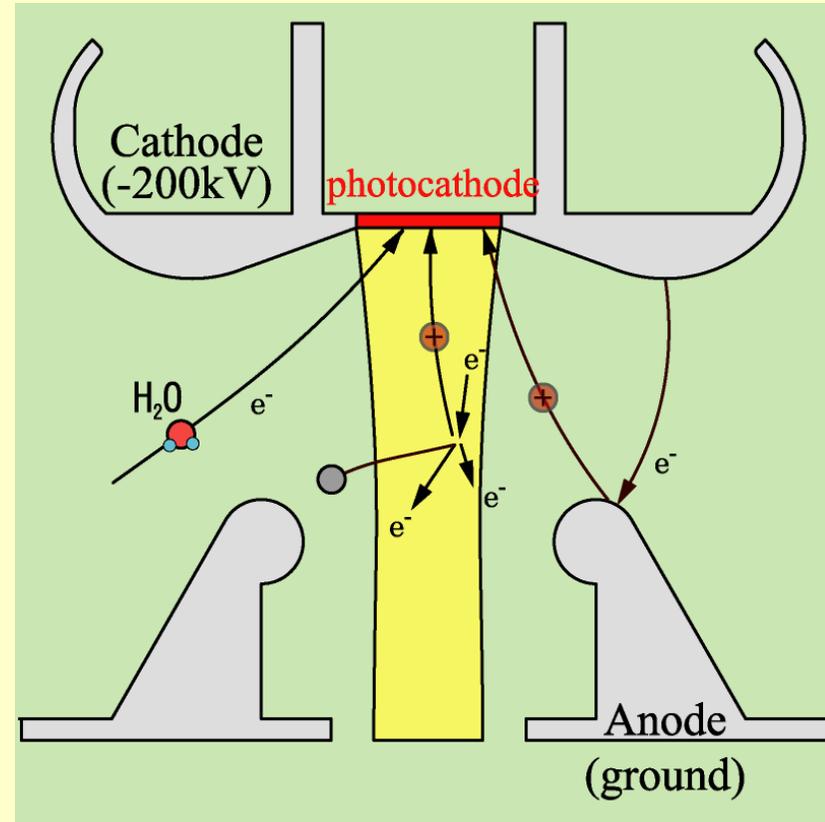
NEA表面寿命(QE寿命)の問題

$$QE(t) = QE_0 \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{gas}}} + \frac{1}{\tau_{\text{DC}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ion}}}$$

NEA表面劣化の主要要因

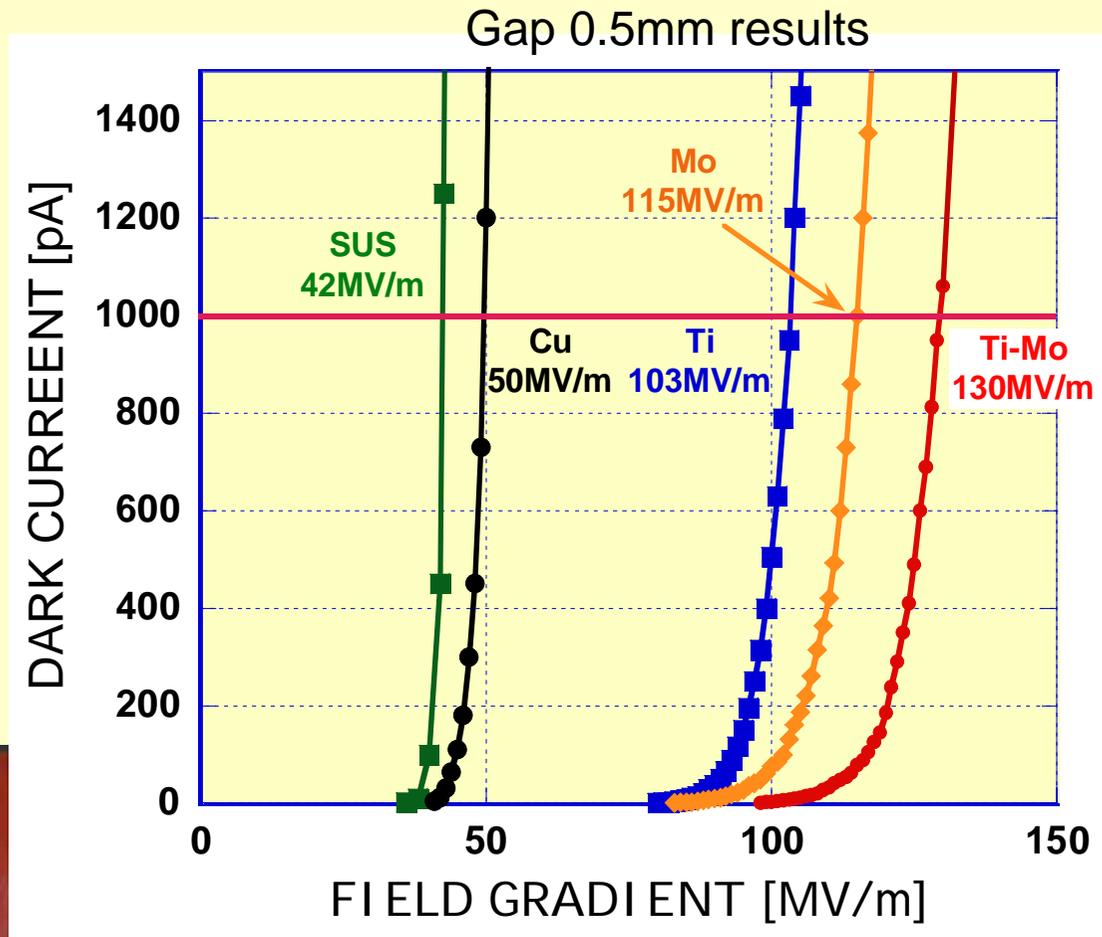
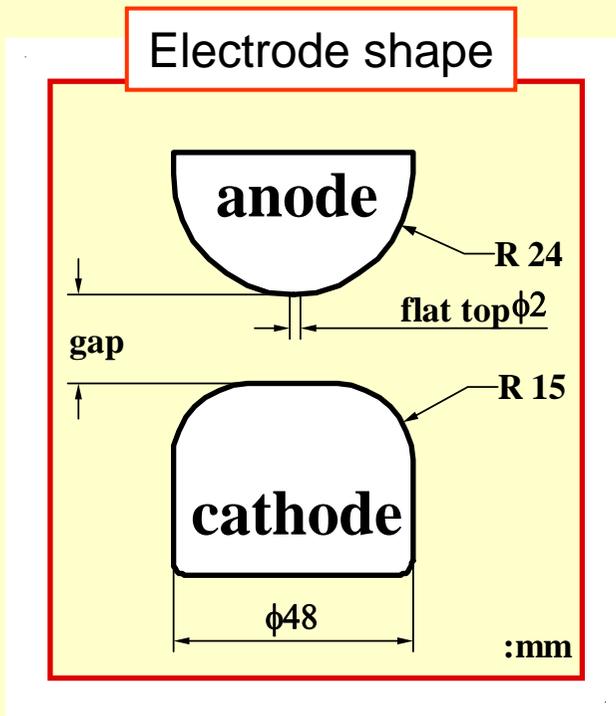
1. 活性分子の吸着
2. 電界放出暗電流
3. イオン衝撃



劣化を遅くするのに必要な条件

- ①超(極)高真空の生成
- ②電界放出暗電流の削減

暗電流抑制に効果的な電極材料の探索



チタン陽極ーモリブデン陰極の組合せがBest。

F.Furuta et al., NIM-A 538 (2005) 33-44

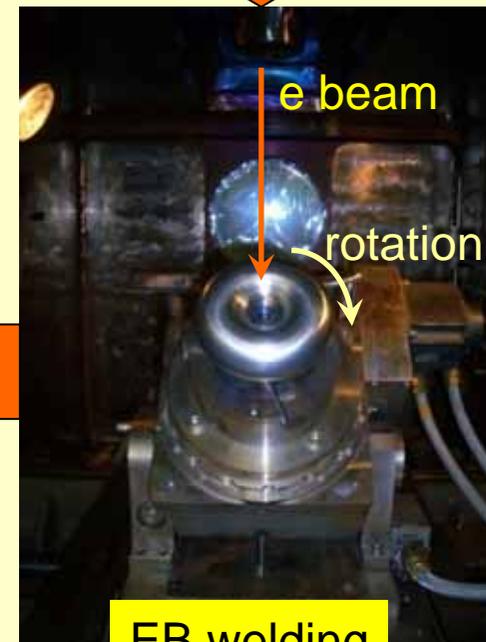
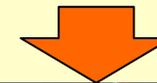
200keV電子銃用モリブデン電極の作製



Pure Mo (99.96%) sheets
(size: 250x250x2 mm)



Hot squeezing



EB welding

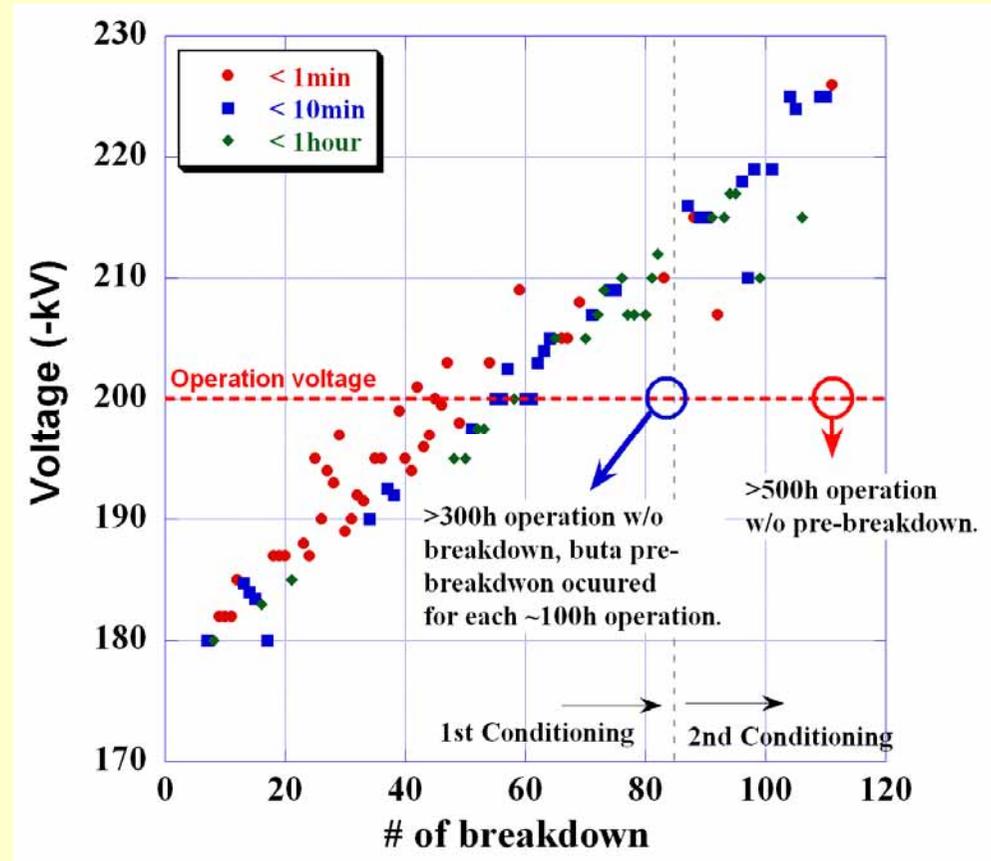
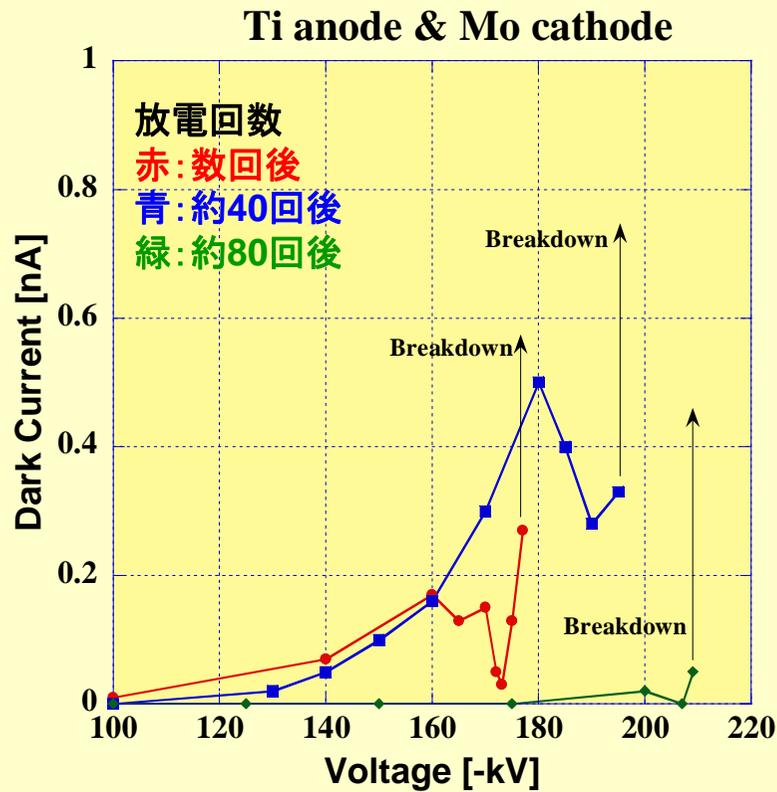


Annealing 400°C 1h



Electro-buff polishing

電極の高電圧試験(チタン・モリブデン電極)



1度の放電につき約0.4kV放電電圧が上昇。

加速電圧200kVにて、
電極間暗電流 <1nA, 持続時間 > 900 hrs

電極間暗電流および高電圧の長期的維持の課題はクリア。

真空度

10⁵ 10⁻³ 10⁻⁴ 10⁻⁵ 10⁻⁶ 10⁻⁷ 10⁻⁸ 10⁻⁹ 10⁻¹⁰

Puck温度

20°C 200°C 300°C 400°C 500°C 600°C

Puckインストール

真空排気

Rough pumping system

Loading chamber

予備加熱(degass)

活性化槽へ導入

NEA活性化

ヒートクリーニング

long magnetic manipulator

Activation chamber

Gun chamber

Ceramic insulators

Solenoid coil

NEG

IP

IP

IP

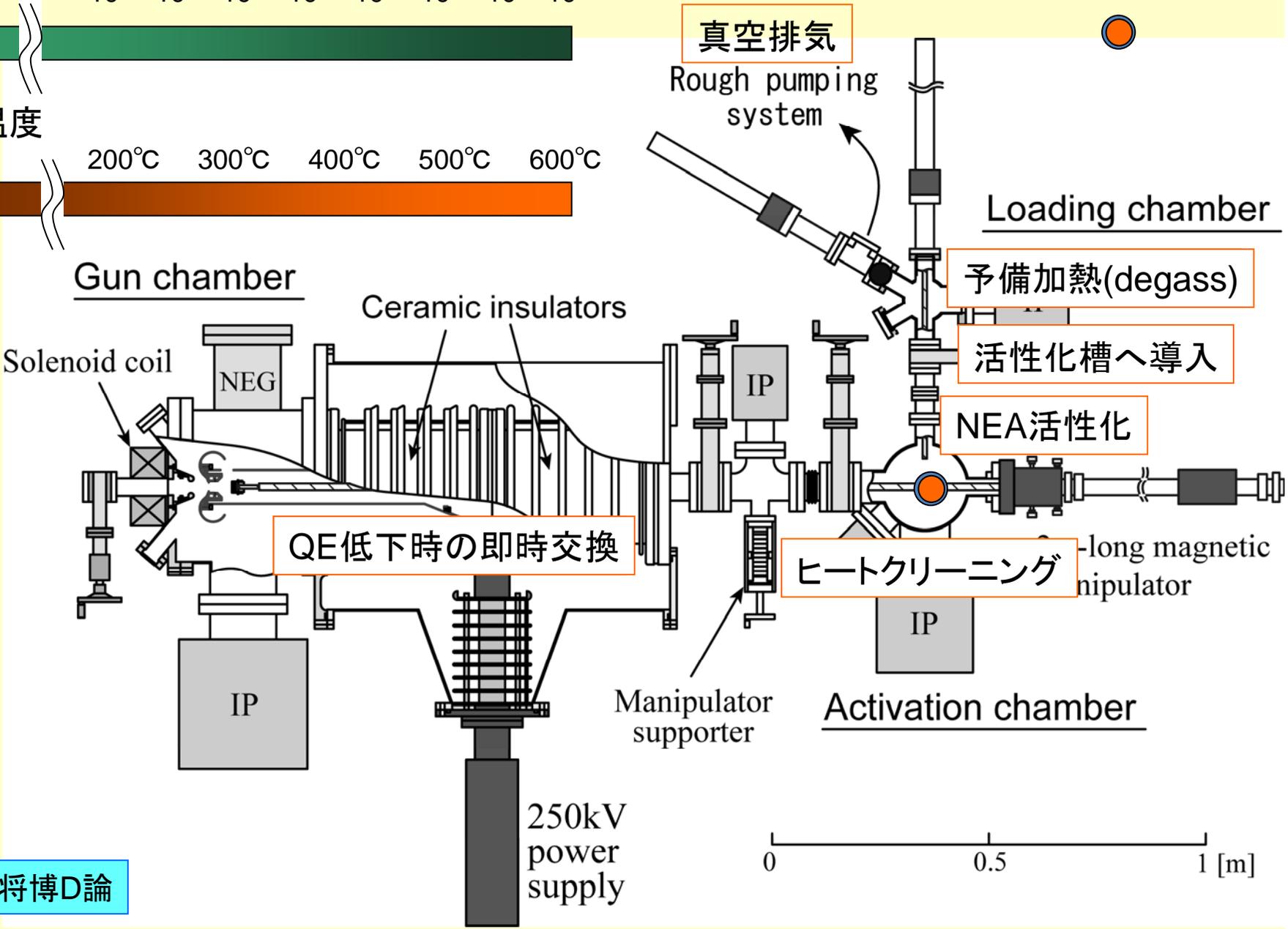
QE低下時の即時交換

Manipulator supporter

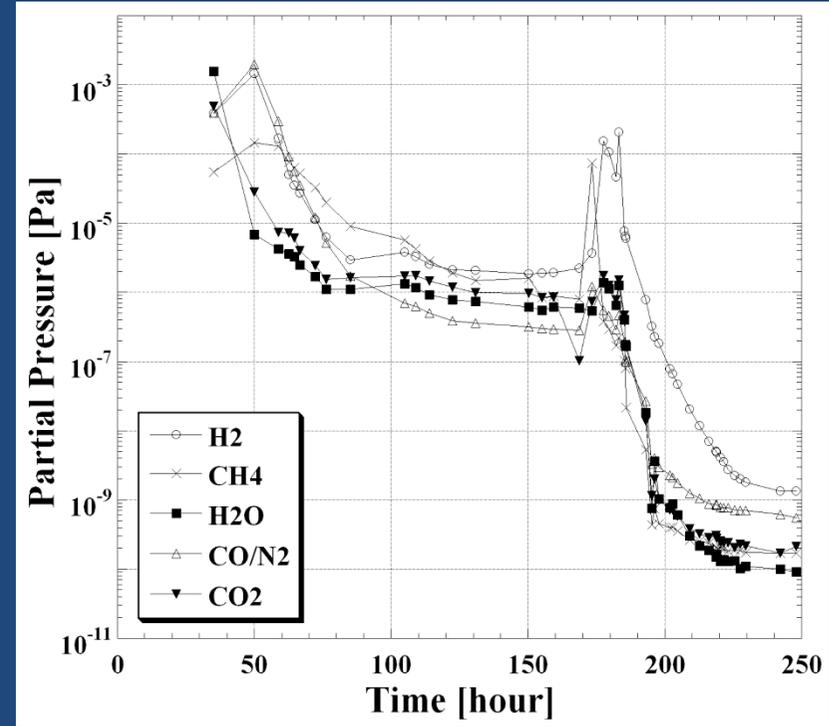
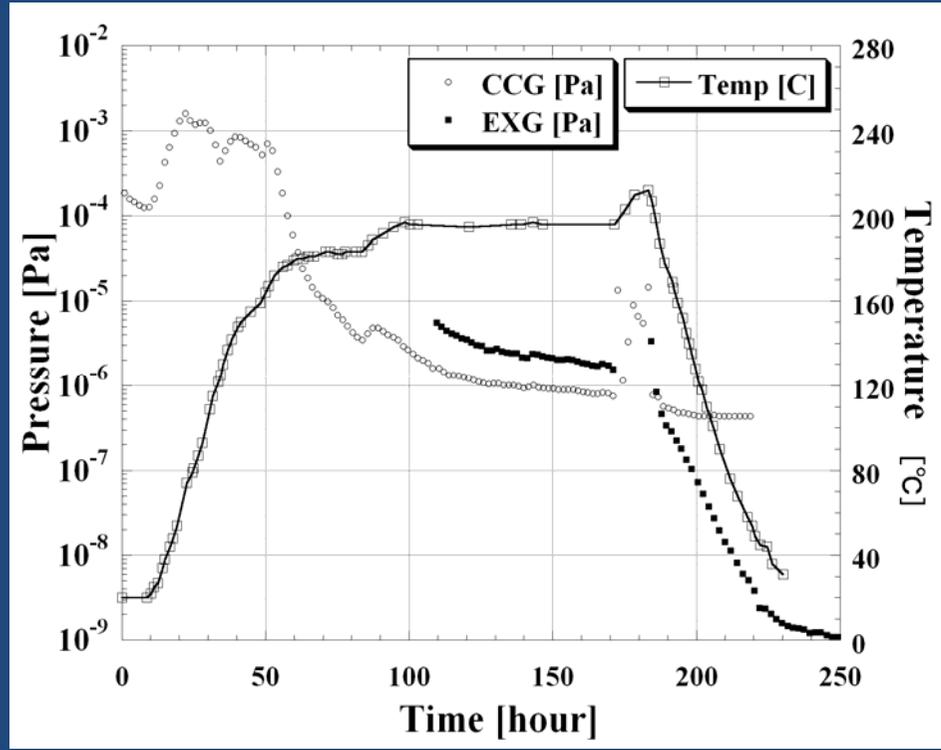
250kV power supply

0 0.5 1 [m]

山本将博D論



200keV電子銃の極高真空度試験



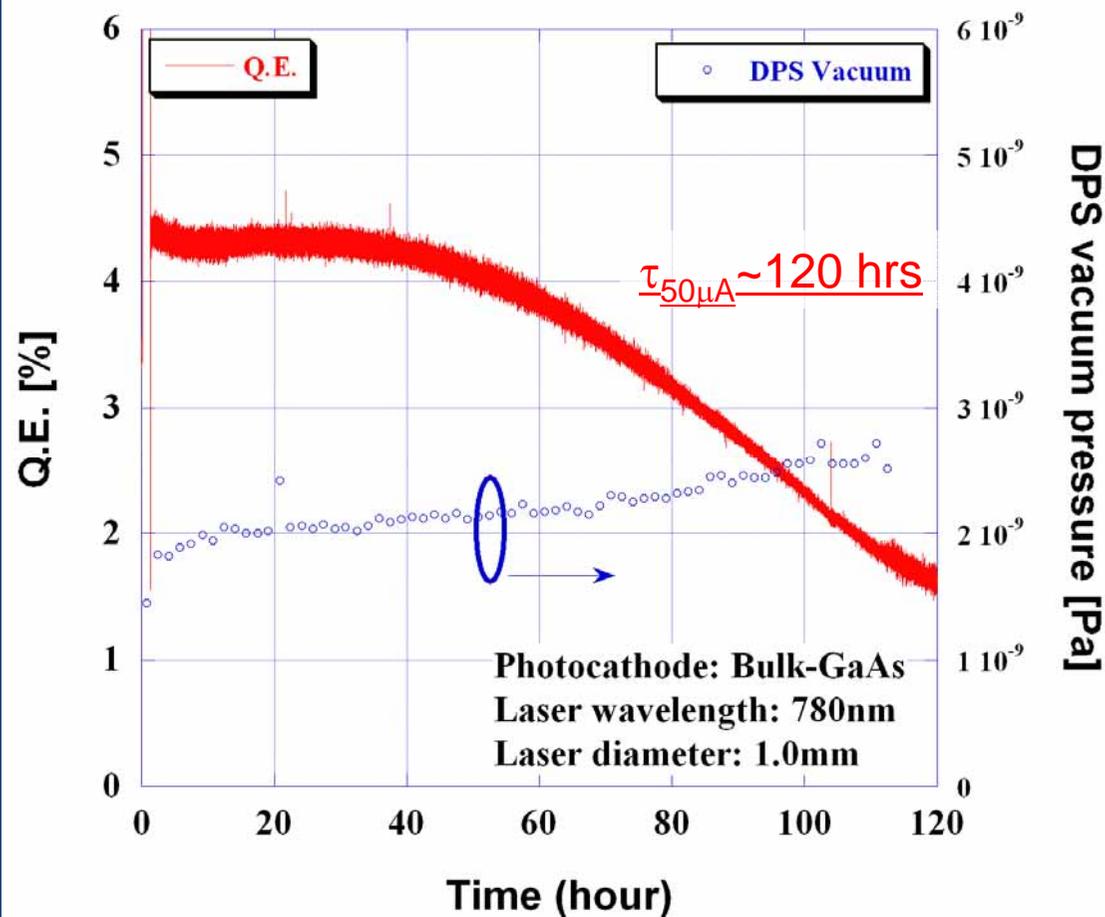
200keV Gun Chamber
主排気系排気速度: ~4600L/s
到達真空度: **5.7x10⁻¹⁰Pa**

残留ガス分析
H₂O: 2.6x10⁻¹¹ Pa
CO₂: 5.1x10⁻¹¹ Pa

NEA表面維持のための極高真空条件はクリア

高電圧運転時に暗電流増加の原因となったためNEGモジュール部はその後取外した。
電子銃の基本真空排気系 (NEG: 850L/s, IP: 360L/s) にて **到達真空度: 2.0x10⁻⁹Pa**。

ビーム出力50 μ AでのQE寿命測定



Photocathode

Bulk-GaAs ($\phi 23\text{mm}$ 丸型)
 初期量子効率 4.5% ($\lambda=780\text{nm}$)

Vacuum Condition

電子銃真空度: $2.3 \times 10^{-9}\text{Pa}$,
 差動排気系真空度(初期)
 : $1.2 \times 10^{-9}\text{Pa}$

Gun condition

加速電圧: -200kV ,
 電極間暗電流: $<1\text{nA}$

Beam condition

レーザー照射径: $\phi 1\text{mm}$,
 ビーム電流: $50\mu\text{A}$ (一定)
 ビームの移送効率 $>96\%$

ILC運転時の平均電流に匹敵する50 μ Aにおいて、
約120時間のOperational lifetimeを達成。

スピン偏極電子ビームの応用分野の開拓 まずSPLEEM装置での実用化をめざす

1990年代 PES国際ワークショップでの情報から
Spin-STMの開発に興味

2000年 PES国際ワークショップ(名古屋大学)に
LEEMの発明者のE. Bauer先生が参加、
これを契機にSpin-LEEMへの関心

2005年1月 E. Bauer先生の弟子、越川孝範氏(大阪電通大)の
SP研訪問、共同研究の要請

4月 JST(日本科学技術振興機構)に対して、

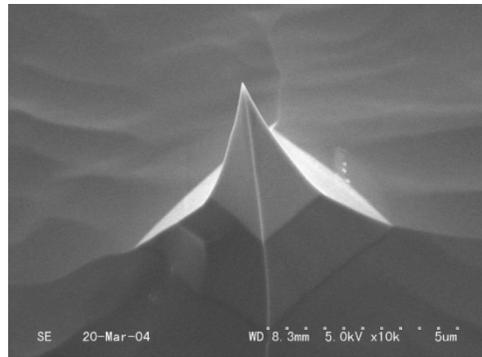
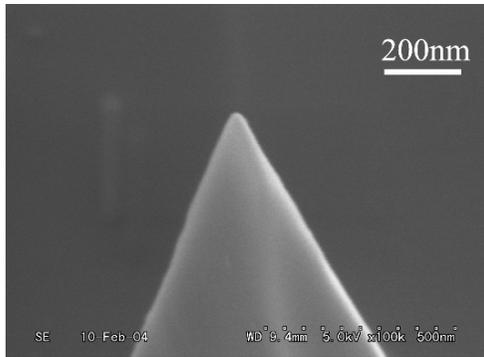
「透過光吸収フォトカソードによる高輝度化」の提案

9月 採択通知→日立中央研究所を含めた

SPLEEMグループの形成

最初の高輝度化へ試み(2003~2006)

Spin-STMへの興味から ニードル状GaAsエミッターの開発

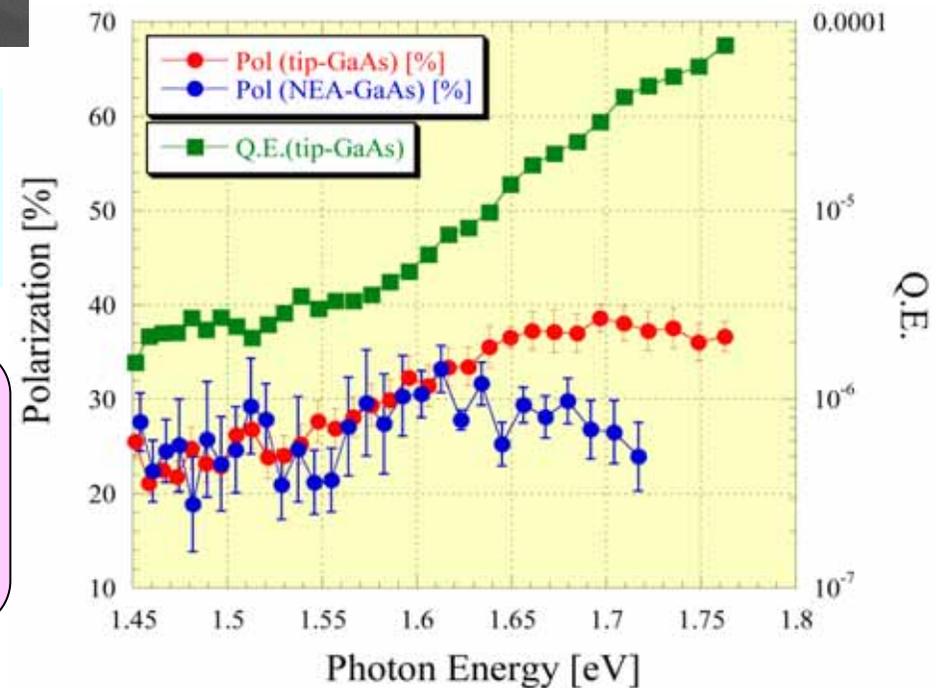
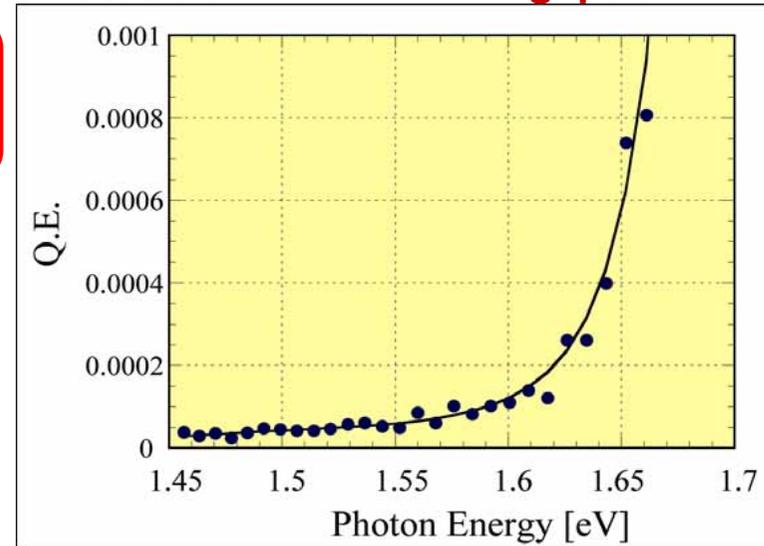


M.Kuwahara et al. JJAP 45 (2006) 6245

● 電界放出機構による
高輝度・偏極電子ビーム生成に成功

- この方法の問題点も明らかとなる
- ▲ 大電流生成が難しい
(原因: tip先端のmelt-down)
(偏極度測定時の取り出し電流 30 nA)

測定条件 HV=-20kV、gap幅=5.34mm



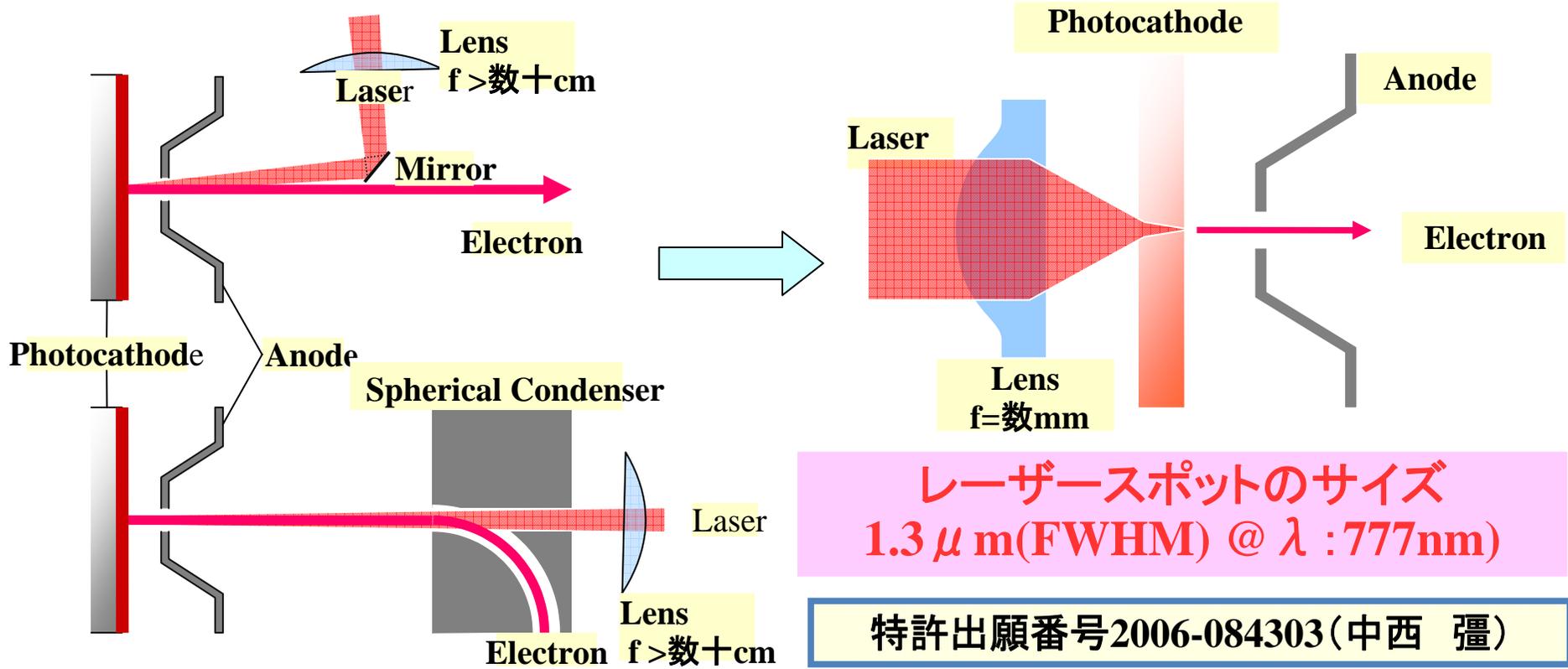
高輝度化への試み(2005~) 透過光吸収型 fotocathode

▲ 前面照射光・吸収型

レーザースポットは
ザブミリメートルが限界となる

● 透過光・吸収型

レーザースポットは
回折限界まで小さくできる

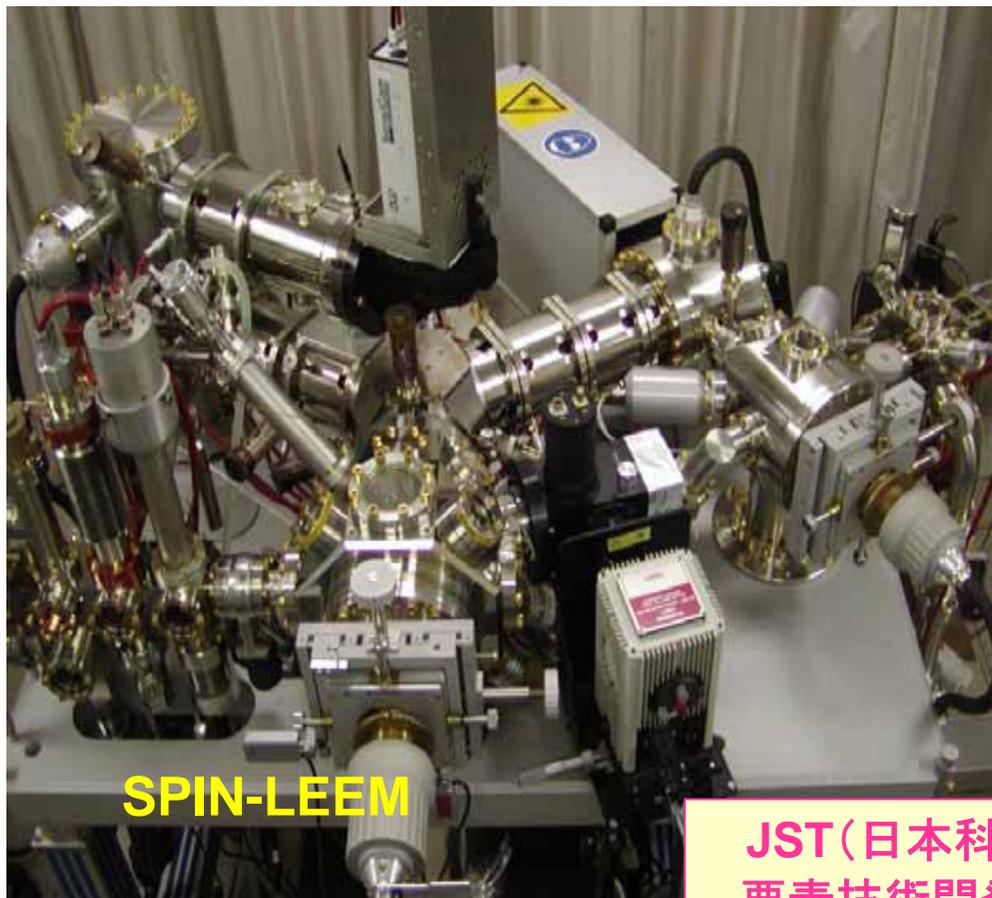


2005年9月: JST-先端計測分析技術プログラムに応募して採択される

スピン偏極技術の他分野への応用

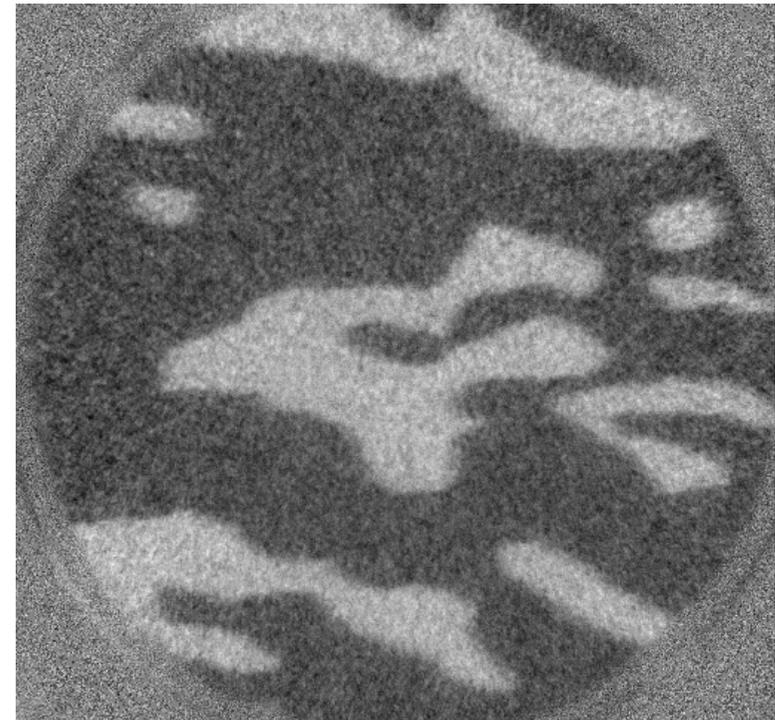
LEEM顕微鏡への応用(1995~)

大阪電通大における“ナノ表面磁区構造の実時間観察観察”の実現が目前!!



大阪電通大所有の装置

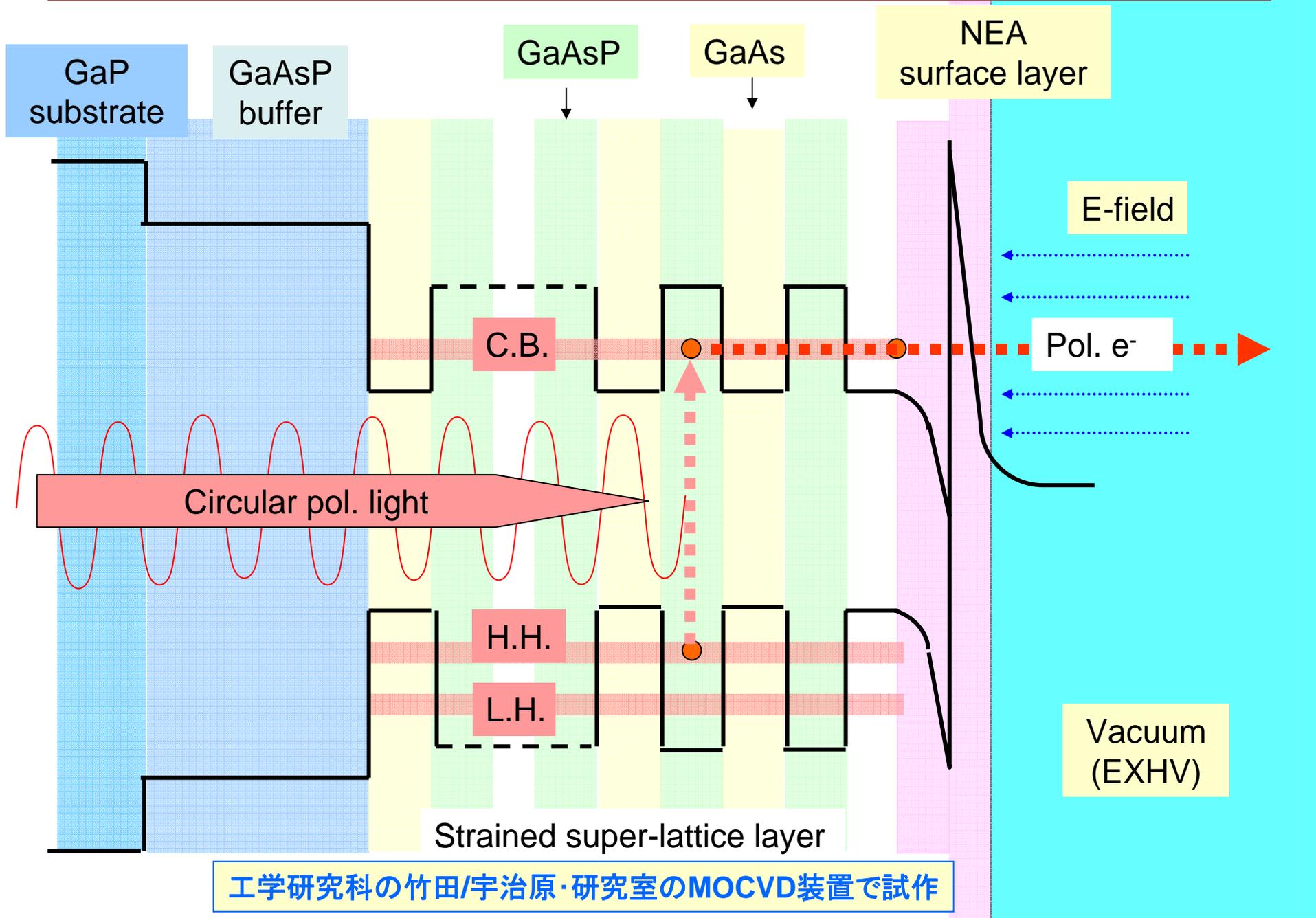
← 1 μ m →



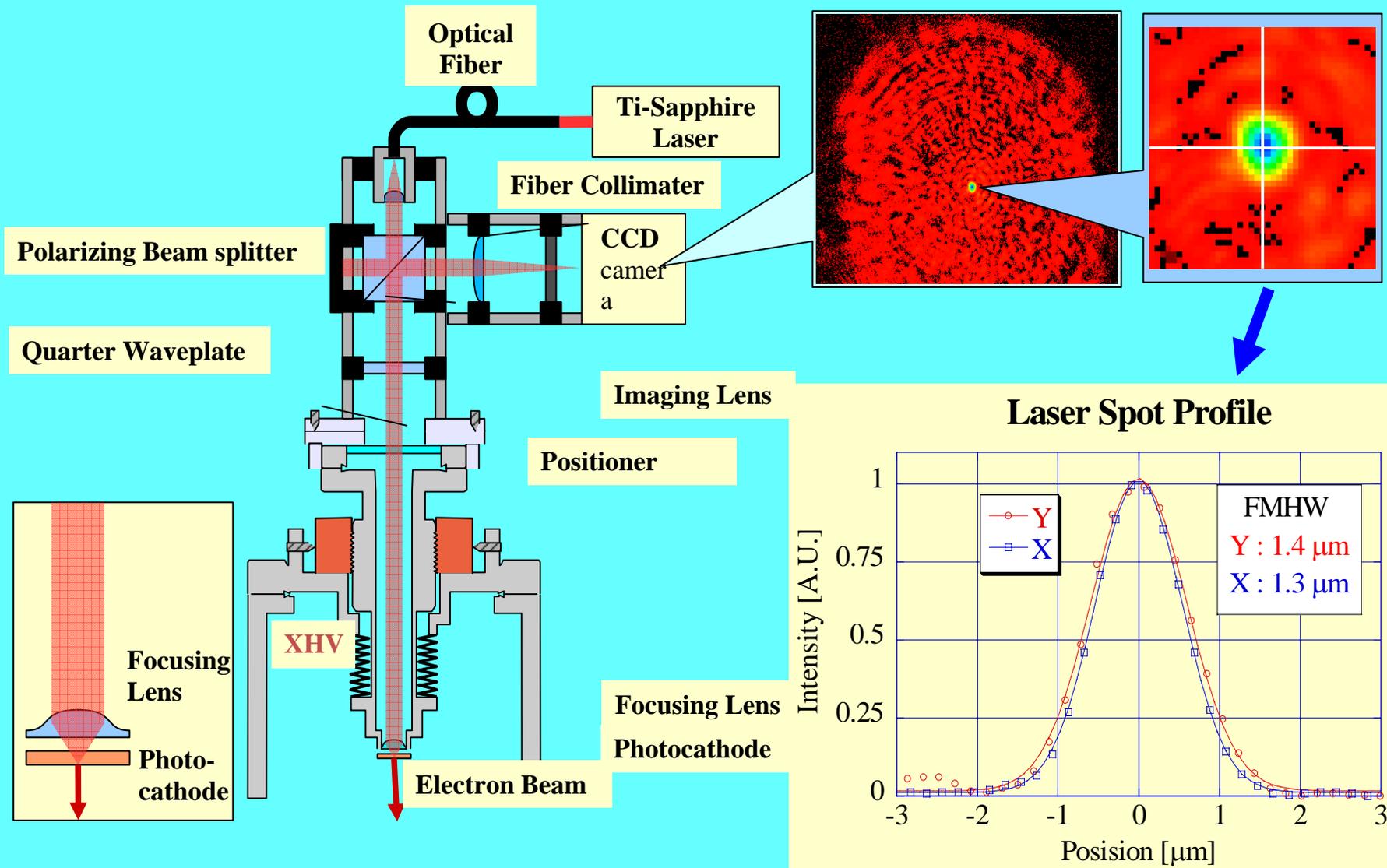
JST(日本科学技術振興機構)の先端計測分析要素技術開発プログラムに採択されて推進開始

大阪電通大所有のデータ

Transmission Photocathode Polarized Electron Source

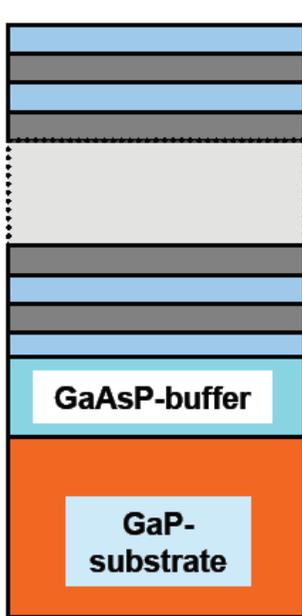


レーザー光収束系(スポット径の測定)



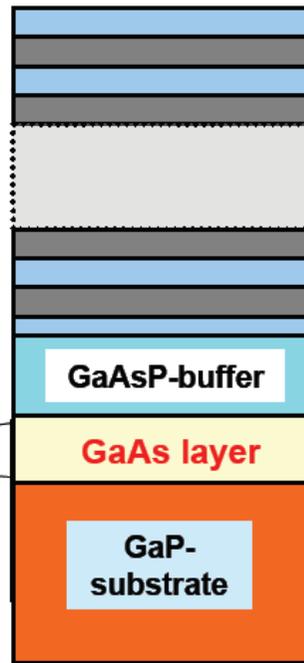
透過光吸収フォトカソードによっても
90%偏極度の達成

Original Design



Pol. ≤ 65%

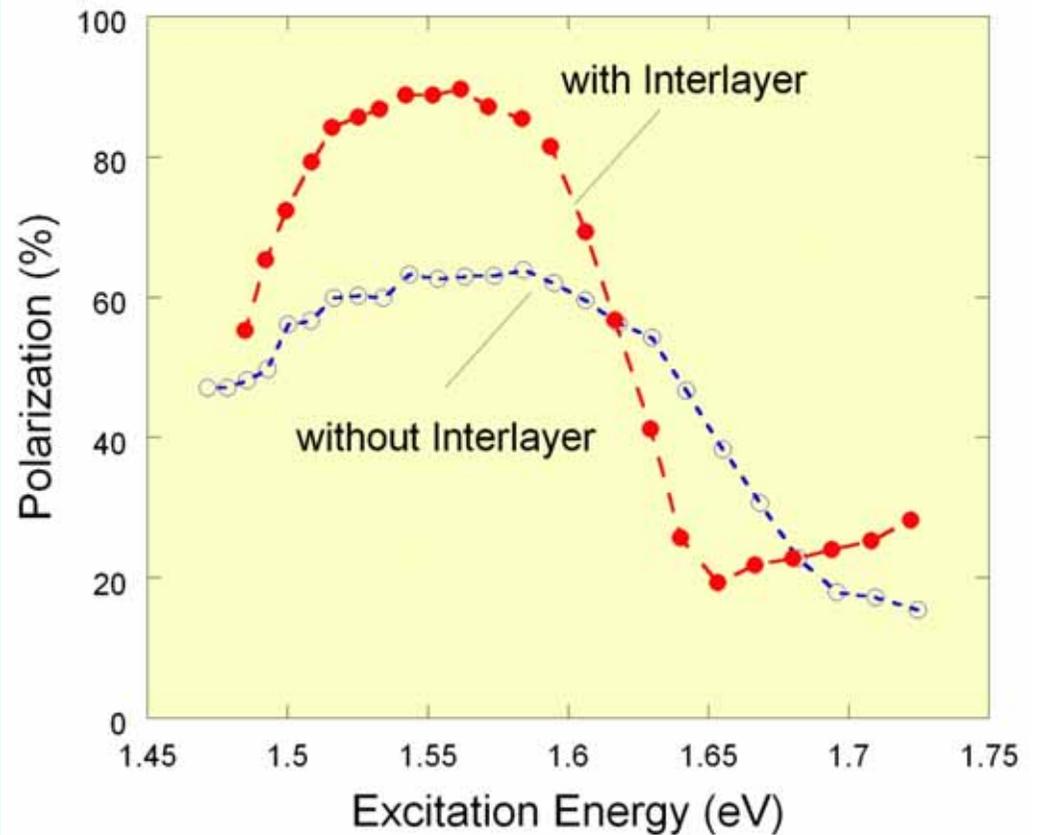
Improved Design



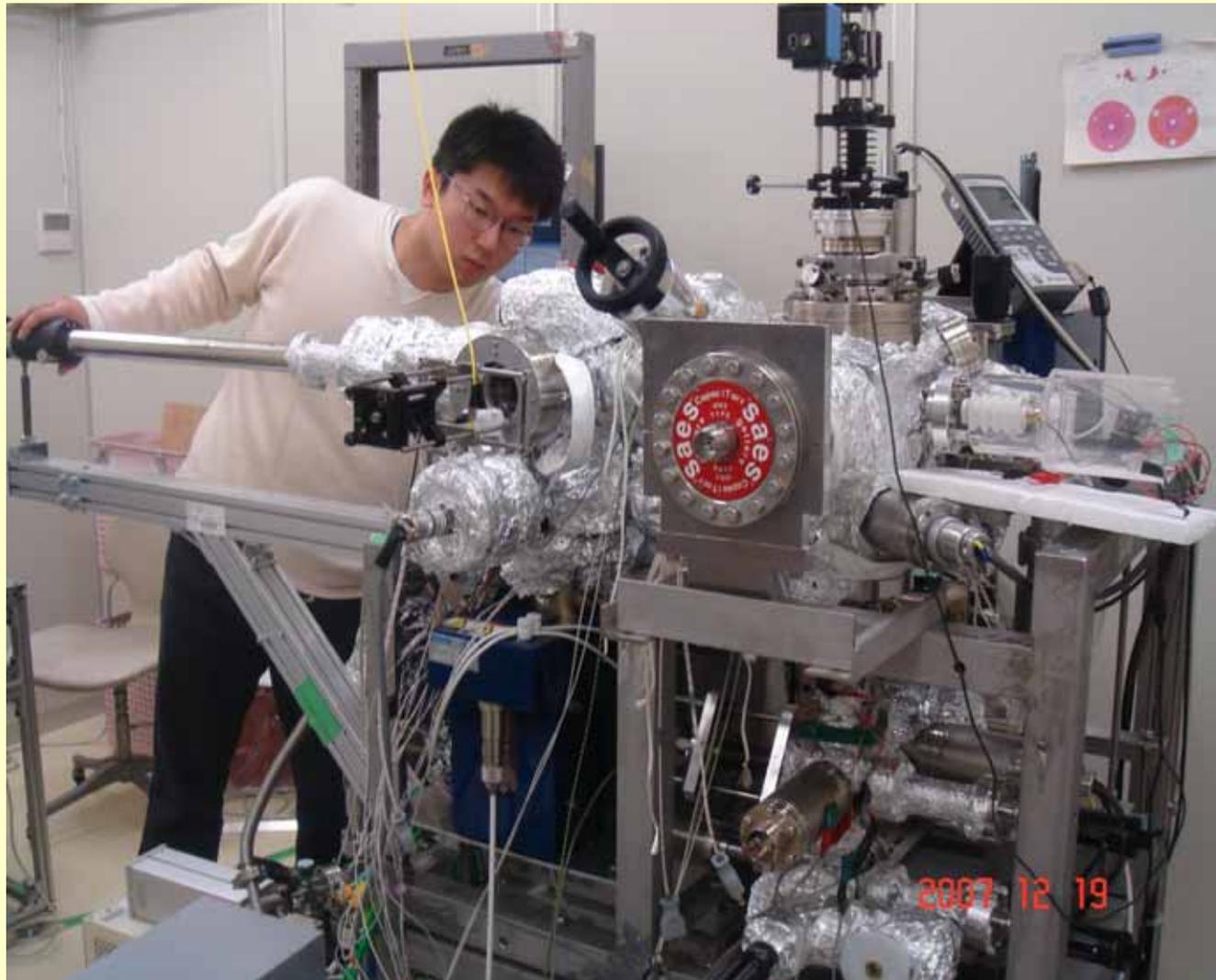
Pol. ~ 90%



GaAs/GaAsP strained superlattice on GaP substrate



透過光吸収フォトカソード型スピン偏極電子源の試作機 (JPES-1)



電子源ビーム輝度の比較

新型偏極電子源 ビーム性能のまとめ

20keV電子銃での比較

| | 現在の SPLEEM 電子源 | 新型 電子源 |
|-------------------------------|----------------------|--|
| 偏極度 (%) | 30 | 90 |
| 輝度 (A/sr/cm ²) | 1×10 ³ | 1.9×10 ⁷ |
| 1画像 取得 時間 (s) | 1~10 | 5×10 ⁻⁵ (0.5 ms)(推 定) |

還元ビーム輝度 (A·m⁻²sr⁻¹V⁻¹)

~10⁹ 冷陰極電界放出型電子源(W)
エネルギー幅:0.3eV, 電流変動(1時間あたり):>10%

~10⁸ 熱陰極電界放出型電子源(W/ZrO)
エネルギー幅:0.7~1eV, 電流変動(1時間あたり):<1%

~10⁷ 透過光吸収型電子源(GaAs-GaAsP超格子)
エネルギー幅:<0.3eV, 電流変動(1時間あたり):<数%

~10⁶ 熱電子源(LaB₆)
エネルギー幅:2~3eV, 電流変動(1時間あたり):<2%

~10⁵ 熱電子源(W)
エネルギー幅:3~4eV, 電流変動(1時間あたり):<1%

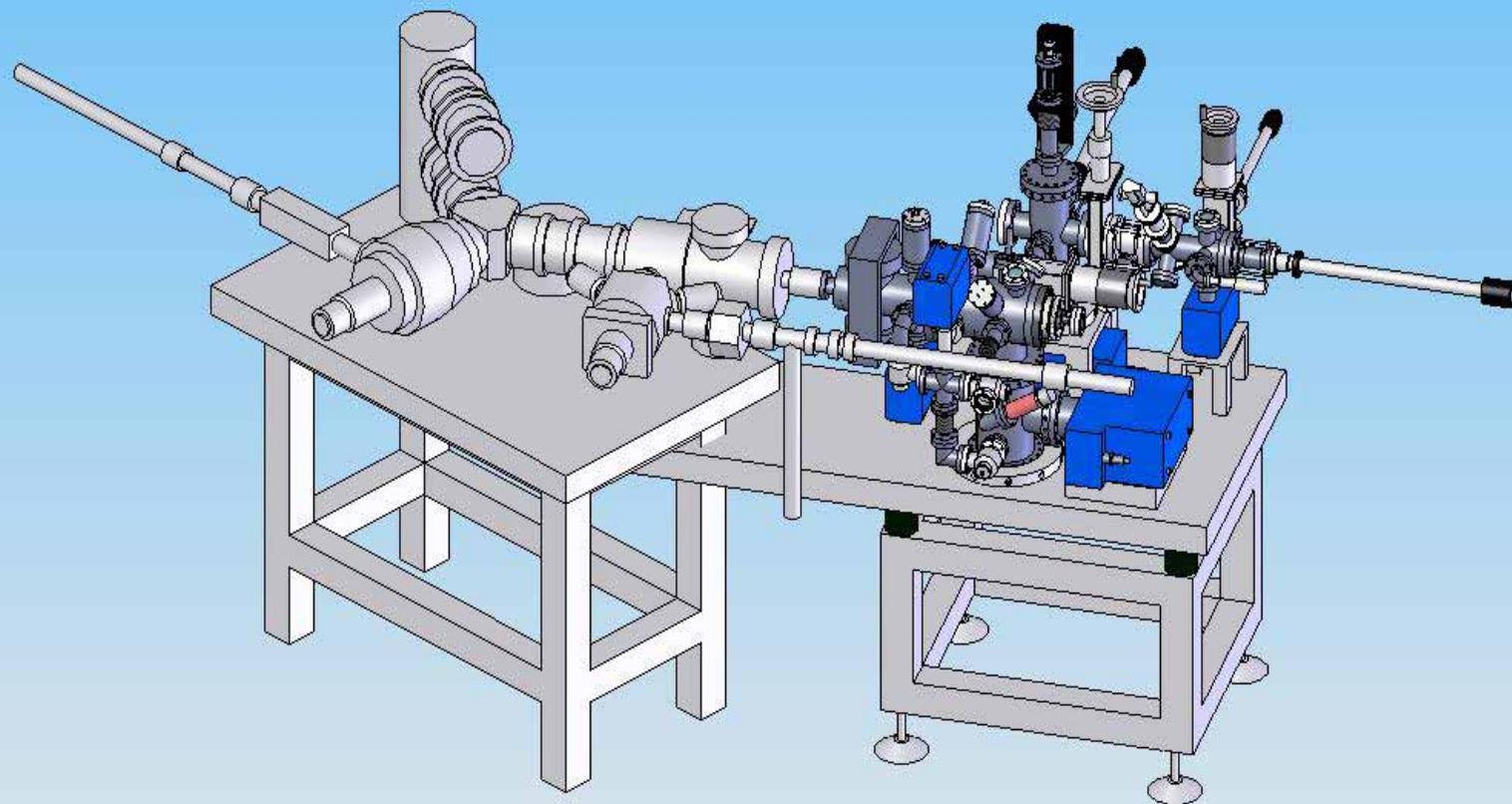
~10⁴ 従来型SPLEEM用電子源(GaAs)

参考URL:

http://www.jeol.co.jp/technical/dictionary/SEMTerms/a-z_06.pdf

LEEM装置(既存)と新型スピン偏極電子源(完成図)

すでに最初のSPLEEM画像取得まで到達している



LEEM装置
大阪電通大で稼働中

偏極電子源装置
名古屋大で製作済み

スピン偏極電子源の高性能化に寄与した新技術開発

光励起偏極機構

半導体 フォトカソード

- 歪みGaAs薄膜 & 歪み超格子薄膜
フォトカソード
- 高偏極度、
- 高量子効率、
- 表面電荷制限現象の克服

レーザー 照射系

- Bragg反射膜挿入
- 高量子効率
- 光背面照射機構
- 高輝度
- 二光子励起機構
- 高偏極度

NEA表面放出機構

暗電流抑制

- モリブデン陰極
-チタン陽極
- 電界放出暗電流の抑制
- 200keV-電子銃での実用化

極高真空環境

- 高品質ステンレス鋼+複合電解研磨+NEGポンプなど
- 排気能力増強
- 放出ガス削減
- 200keV電子銃
50 μ A × 120時間の連続運転

共同研究者への謝辞

奥見正治、山本将博、
(名大理SP研)

高エネルギー
ビーム物理学

吉岡正和、松本 浩、大森恒彦、栗原良将、栗木雅夫、 (KEK)

小早川久、竹田美和、宇治原 徹、高嶋圭史、山本尚人、(名大工)

堀中博道 (大阪府大)

半導体
物理学

坂 貴 (大同工大)、加藤俊宏 (大同特殊鋼)

大嶋 卓、孝橋照生 (日立中研)

電子顕微鏡
物理学

越川孝範、安江常夫 (大阪電通大)

SP研に在籍したひと（1984～2009の25年間）への謝辞

学士号取得者(所属者7人、学位取得者7人)

長谷部大輔、伊東啓輔、山崎淳(→京大)、豊田貴之、水野和恵(→東大)、宇津輝、齊藤光

修士号取得者(進学者28人、学位取得者27人)

堂前和彦、広瀬郁夫、生駒哲明、倉品満、武田保敏、土屋公央、津幡充、越河勉、谷本育律、高橋千賀子、中原耕二、菅生和範、井田貴之、和田公路、倉橋祥子、渡辺淳、宮本延春、廣瀬友紀、水野龍、浪花健一、安井健一、酒井良介、玉垣邦秋、真野篤志、許斐太郎、中川靖英、(宇津輝)

博士号取得者(進学者14人、学位取得者10人)

青柳秀樹、多和田正文、渡川和晃、中村真介、鈴木千尋、西谷智博、古田史生、桑原真人、山本尚人、山本将博、(津幡充)(高橋千賀子)(和田公路)(宮本延春)

卒業生のうち、ビーム物理関係の従事者 13名
SPring-8: 1名、KEK: 4名、理研: 2名、豊田中研: 1名
名大: 2名、東大: 1名、企業: 1名

スピン偏極電子ビーム源のこれからの展開

(1) リニアコライダー用実用機の製作へ

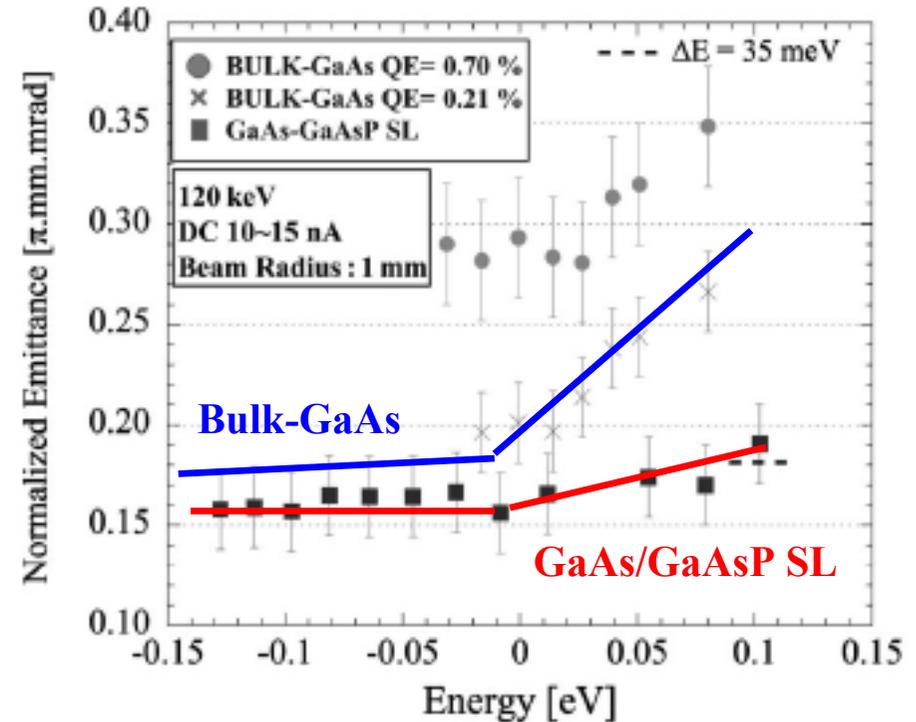
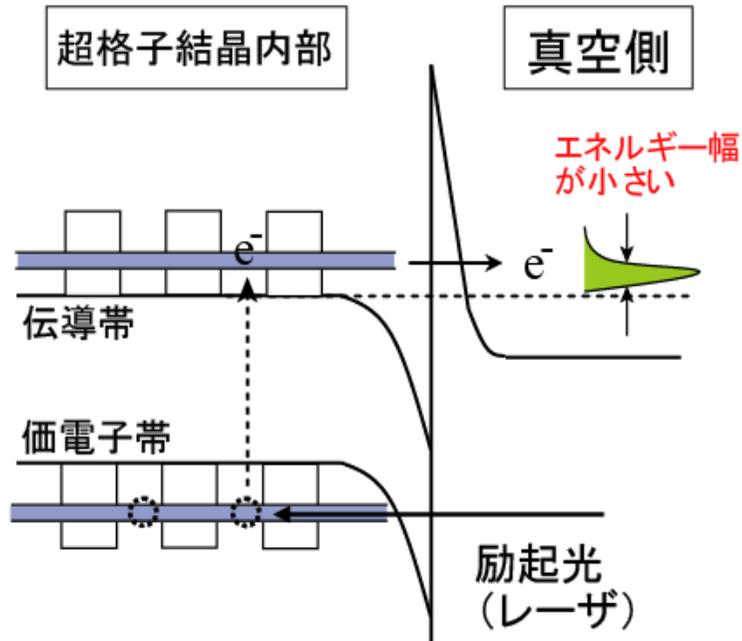
(2) 次期放射光源加速器(ERL)用500keV電子銃の製作へ
技術移転 + 新技術開発

(1)と(2)の推進コアメンバーとして、山本将博君は4/1付でKEKへ転出

(3) 電子顕微鏡分野への応用

JST(日本科学技術振興機構) 先端計測分析技術の開発
Spin-LEEM、Spin-TEM、Spin-IPES など

共同研究者やSP研卒業者によるさらなる発展に期待!!!



超格子フォトカソードはバルク結晶より初期エミッタンスを低く抑えられる。

NEA-GaAsフォトカソードを用いた超低エミッタンス電子ビーム生成の可能性を実証

$$\varepsilon_{nx,rms} \sim 0.1 \pi.\text{mm.mrad}$$

次世代放射光源(ERL等)に不可欠な超低エミッタンス電子ビーム源に利用できる

発表論文: N. Yamamoto et al. Journal. of Applied Phys 102, 024904 (2007)

興味のある新技術開発

500keV電子銃
の実用化

10-11Pa台に入る極高真空技術

ERL用
フォトカソード

Ti-Zr薄膜蒸着のポンプ性能の向上

ダイヤモンド結晶のNEA性の確認と実用化

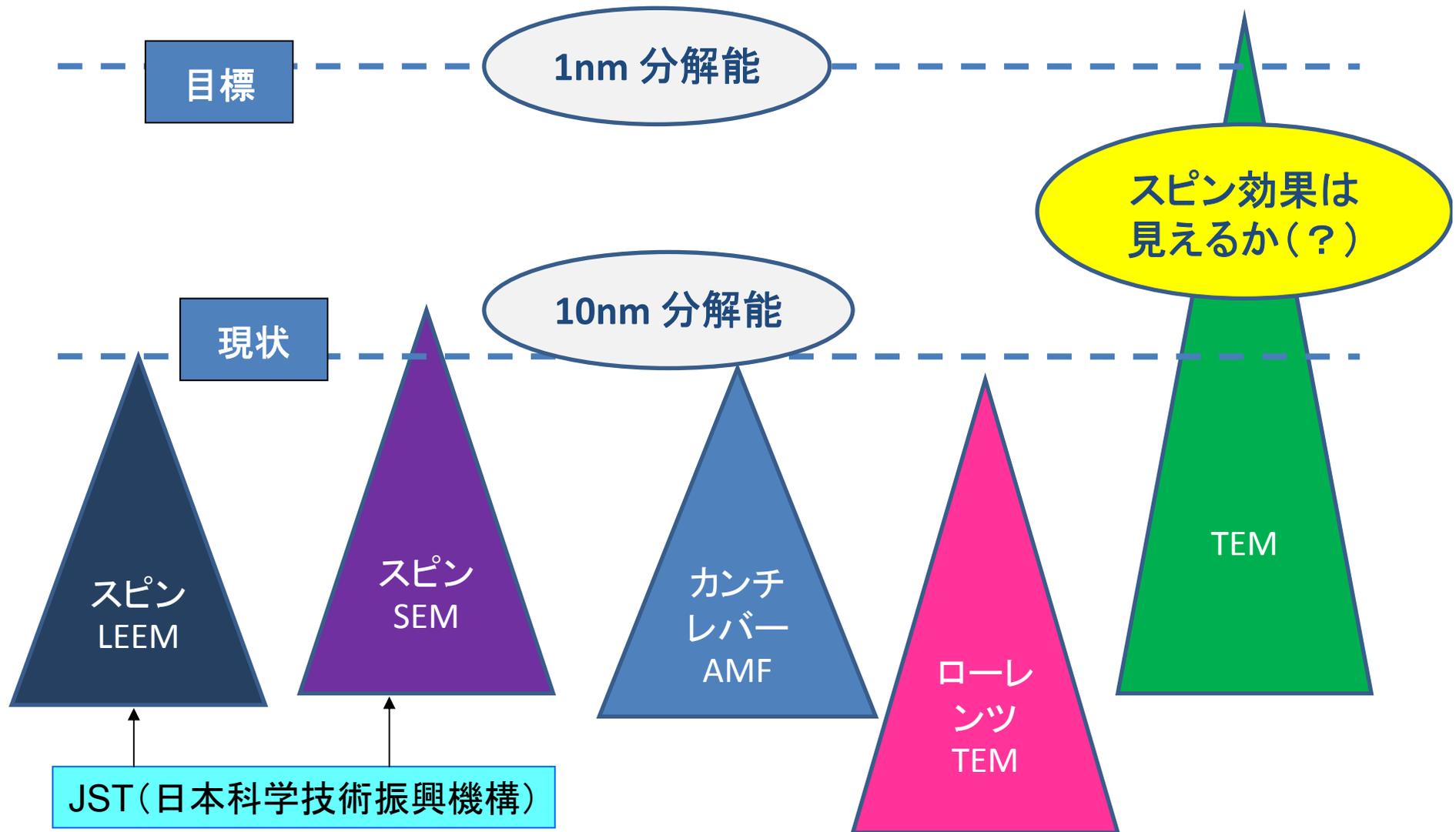
Cs-Teフォトカソードによる
低エミッタンス化

偏極電子ビームの
高エネルギー分解能化

干渉性の良い偏極電子ビーム
の生成

GaN-tipからの偏極電子ビーム生成

スピン電子顕微鏡のつぎの目標ターゲット： 1nmを切る分解能での磁区構造観察



ご清聴ありがとうございました。

長い間の
教室の皆様のご支援に
対して
お礼を申し上げます。

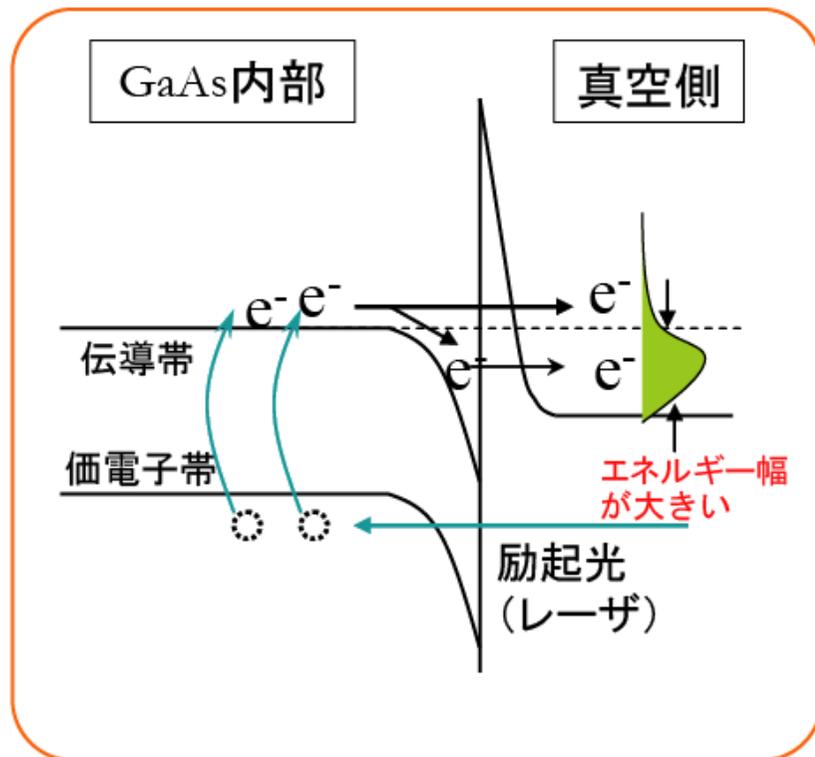
坂田先生の哲学

「天才でなくても、**方法論**さえ見つけられれば
良い仕事ができる」

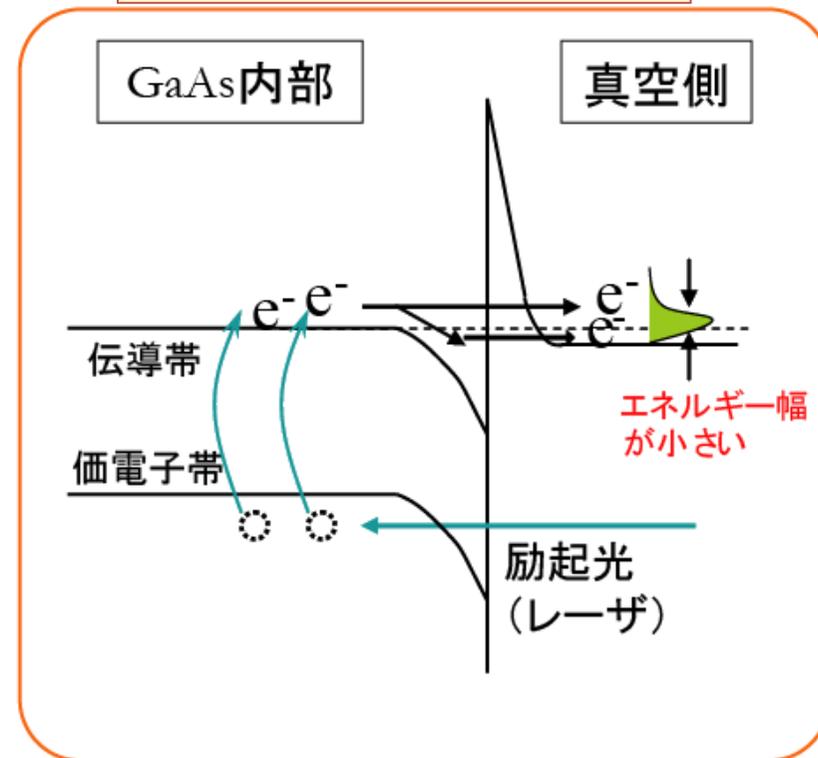
(3) 低エネルギー分布化

Band-gap励起 + NEA最小 ($\chi \approx 0$) 化
の2つの条件が満たされると、微小電流で良ければ、
“電子エネルギー拡がり”を「熱格子運動エネルギー」
まで原理的には抑制できる

NEA (χ) \approx (100~200)meV



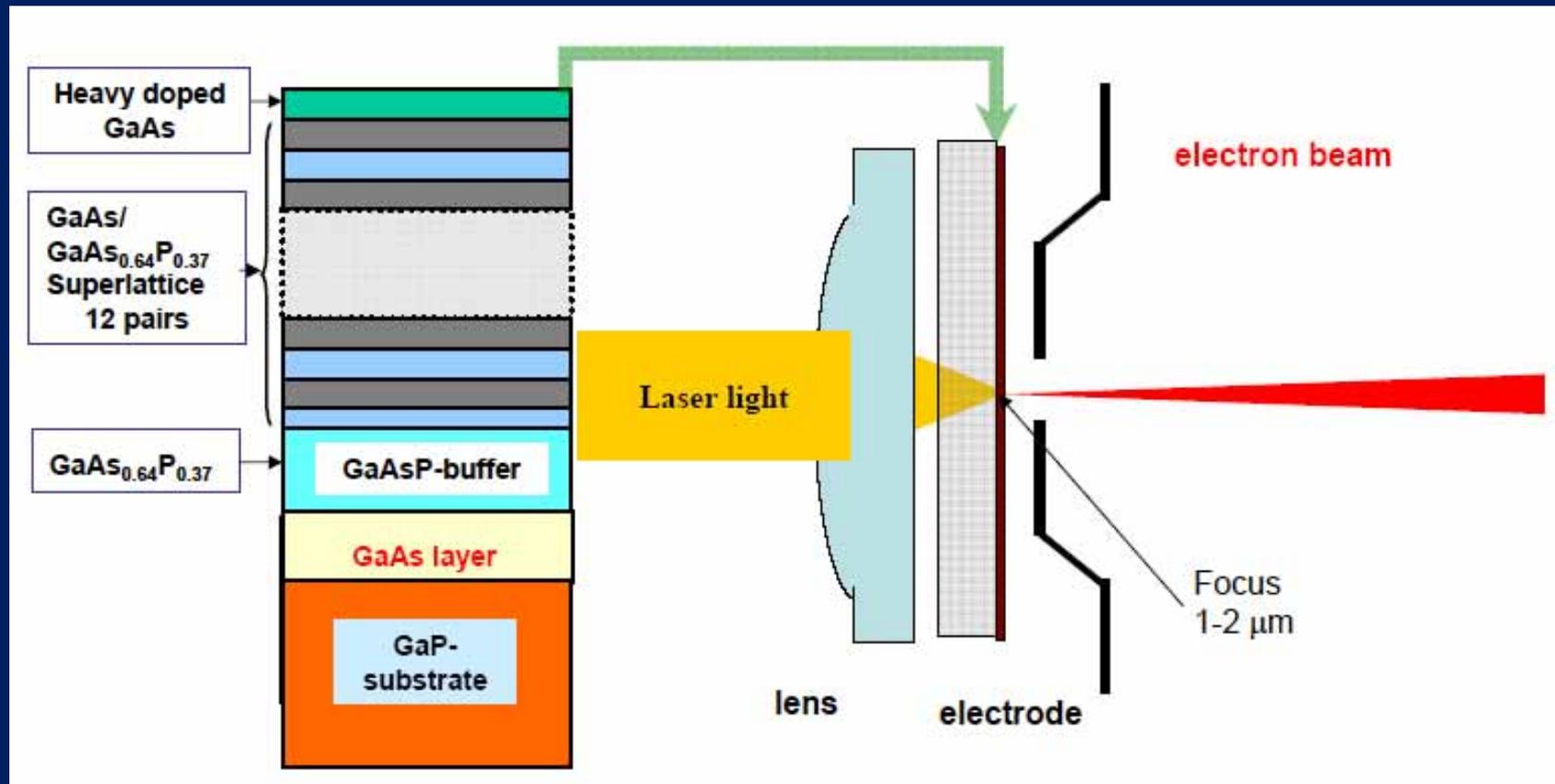
NEA (χ) ≈ 0



スピン偏極電子ビームの応用分野開拓(これから)

高輝度・高偏極度のスピン偏極電子源を
シーズにして

特許を2件取得



なぜ、半導体フォトカソード電子源か？

(I) ビーム性能

1. 高いスピン偏極度
2. 高い量子効率
3. 高いピーク電流密度
4. 低いエミッタンス
5. 高いビーム輝度

(II) 装置性能

長時間の安定性 (NEA
表面を守る) には
ハイレベル技術が必要!!!

(我々の開発研究によって)

すべての性能で、他の偏極電子源に優るし
ほとんどの性能で、無偏極電子源にも劣らない

NEA-GaAsフォトカソード型偏極電子源
物理機構 \leftrightarrow ビーム性能

フォトカソード型 \leftrightarrow レーザー波形 \leftrightarrow 電子ビーム波形(時間) \leftrightarrow パルス生成

レーザースポットサイズ \leftrightarrow 電子ビームサイズ(空間) \leftrightarrow ビーム輝度

円偏光の右巻き/左巻き変換 \leftrightarrow Pockels Cellなど \leftrightarrow スピン反転(高速)

円偏光励起を用いた偏極機構 \leftrightarrow 結晶のバンド構造 \leftrightarrow 電子スピン偏極度

重い正孔の選択励起 \leftrightarrow band gap励起 +

NEA表面放出機構 \leftrightarrow 高い偏極度

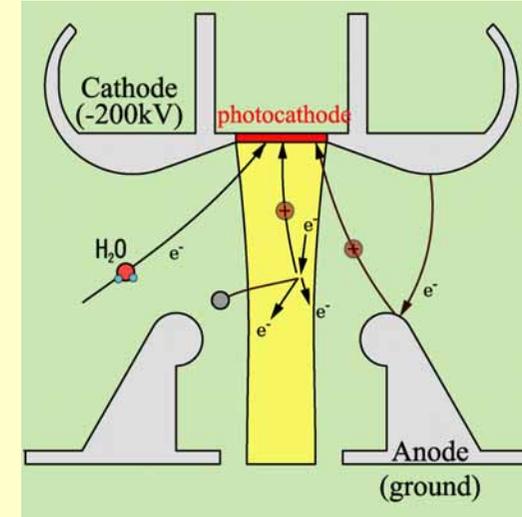
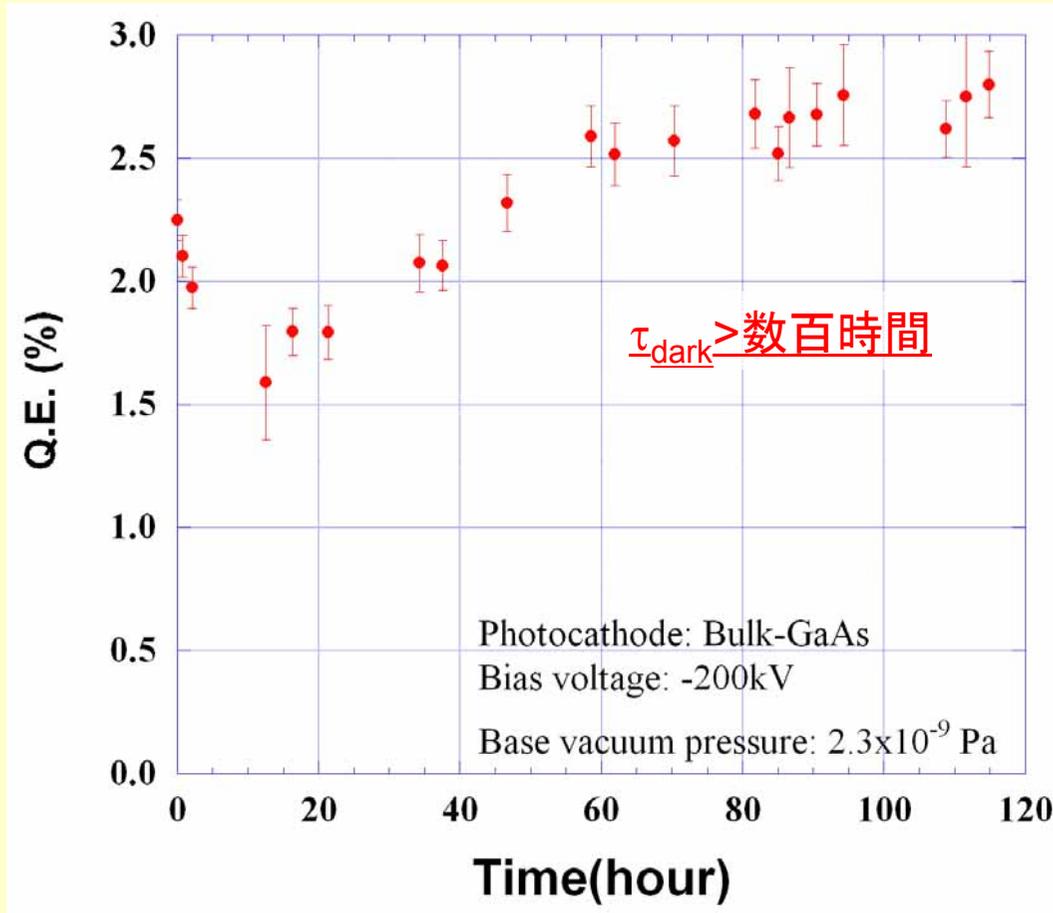
NEA表面を用いた放出機構 \leftrightarrow PEAに比べて高い量子効率

NEA表面放出機構 \leftrightarrow 電子ビームのエネルギー分布(幅)

NEA表面電荷制限現象 \leftrightarrow 電流密度に対する制約

NEA表面の劣化 \leftrightarrow NEA減少 \leftrightarrow 量子効率減少 \leftrightarrow 寿命問題

基本性能測定: Dark lifetime



$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{gas}}} + \frac{1}{\tau_{\text{DC}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ion}}}$$

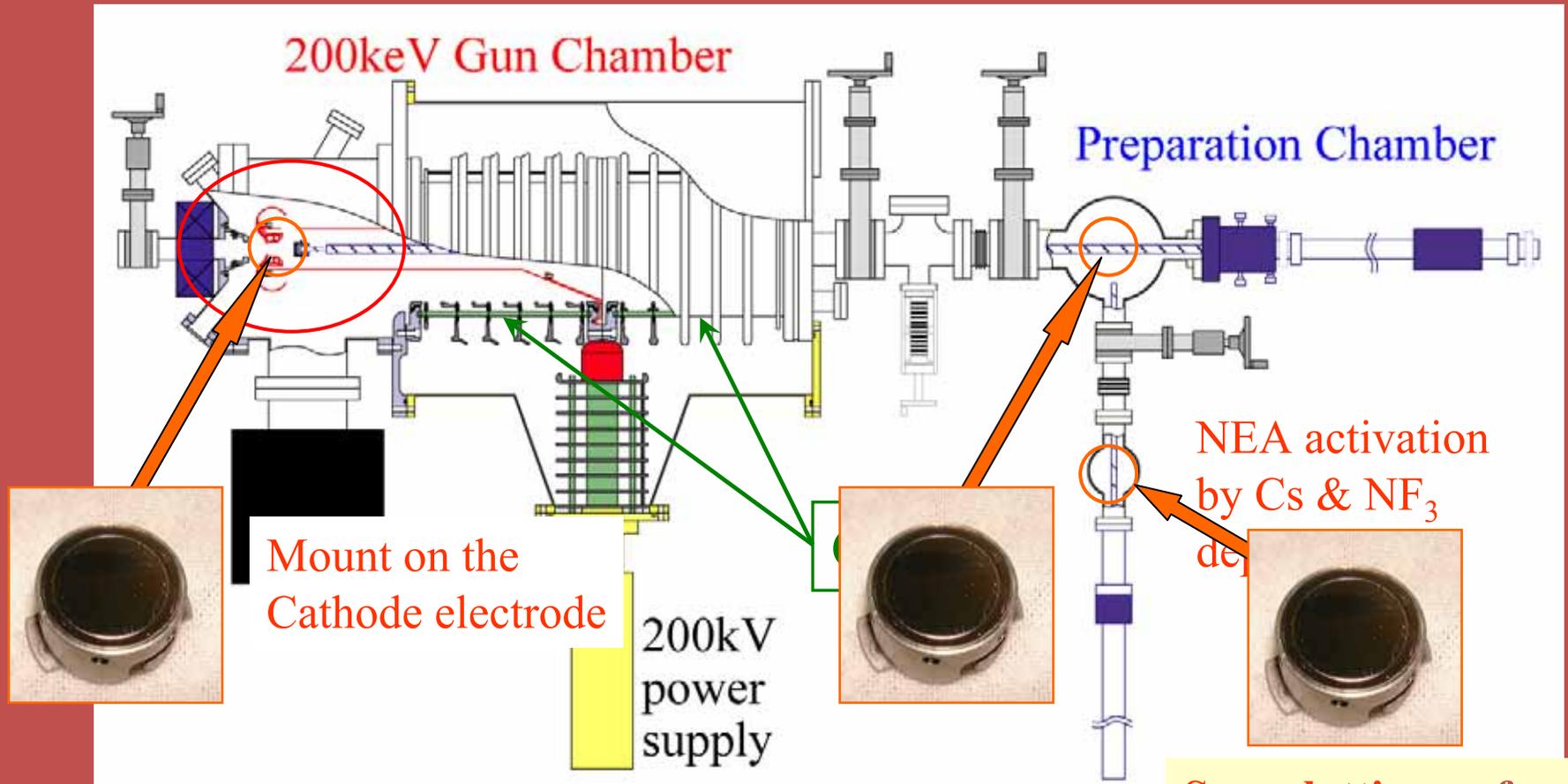
$$\frac{1}{\tau_{\text{dark}}} = \frac{1}{\tau_{\text{gas}}} + \frac{1}{\tau_{\text{DC}}}$$

τ_{dark} が τ_{ion} に比べ十分長い場合、

$$\frac{1}{\tau} \sim \frac{1}{\tau_{\text{ion}}}$$

として、ビーム電流量に依存する運転寿命 (Operational lifetime) の評価ができる。

200 keV Polarized Electron Gun



Ultra high vacuum $\sim 10^{-10}$ Pa

High Field Gradient ~ 3.0 MV/m

Photocathode preparation
(cleaning, NEA activation)