

量子技術イノベーション戦略の戦略見直し検討
ワーキンググループ（第4回）
令和3年12月6日(月) 10時00分～12時00分



量子インターネット

大阪大学

基礎工学研究科

量子情報・量子生命研究センター(QIQB)

山本俊



自己紹介



山本俊
 大阪大学 大学院基礎工学研究科 物性物理工学領域 教授
 量子情報・量子生命研究センター（QIQB）副センター長
 専門分野：量子光学、量子情報
 出身：山口県（宇部高等学校）



略歴：

- 2018年10月1日 - 現職
- 2011年4月 大阪大学 大学院基礎工学研究科 准教授
- 2007年4月 大阪大学 大学院基礎工学研究科 助教
- 2004年4月 大阪大学 大学院基礎工学研究科 特任助手
- 2003年4月 総合研究大学院大学 JST-CREST研究員
- 2003年3月 総合研究大学院大学先導科学研究科光科学専攻修了 博士（理学）
（指導教員：井元信之）

兼任

- 2018年9月 - 10月 ペンシルベニア州立大学（米）Visiting scholar
- 2016年4月 - 9月 ワシントン大学セントルイス（米）Visiting scholar

所属学会：日本物理学会、応用物理学会

学会及び社会活動：量子技術イノベーション拠点推進会議 知財・標準化分科会 委員、電子情報通信学会量子情報技術特別研究専門委員会委員（第8期幹事）、Quantum internet task force (QITF) アドバイザリーボード、量子ICTフォーラム会員

受賞歴・表彰歴：2015年大阪大学総長奨励賞 研究部門、2014年文部科学大臣表彰若手科学者賞、2009年日本物理学会若手奨励賞、2004年井上研究奨励賞、2003年長倉研究奨励賞、2003年総研大研究賞



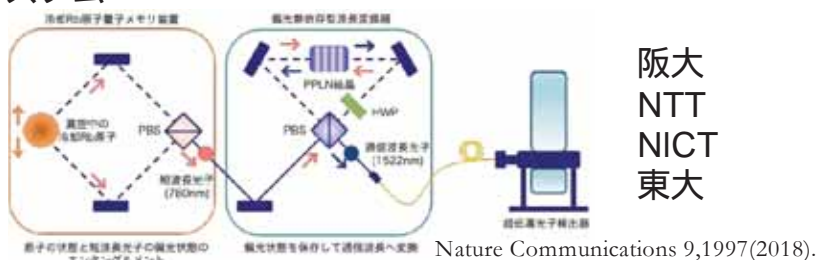
量子インターネット
低温工学



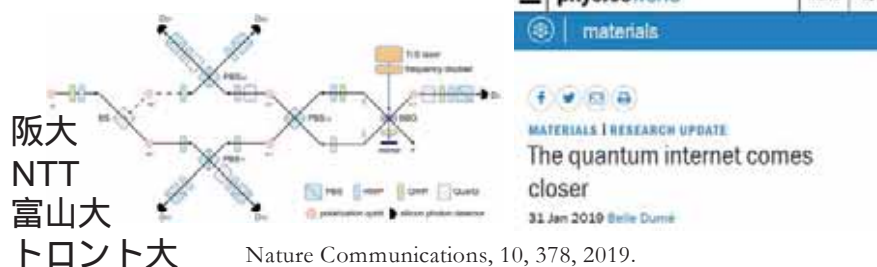
研究プロジェクト@阪大山本G

JST-CREST 「**グローバル量子ネットワーク**」
 (代表：井元、参加者：山本他) 2016~2022年
量子インターネットの長距離化技術開発

◆原子量子メモリとファイバー通信光子の量子もつれ通信システム



◆(全光)量子中継の原理実証



NTT : 量子周波数変換器実装
 NICT: 超伝導光子検出器の実装

内閣府・JSTムーンショット研究開発事業 目標6
 「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」(PD: 北川勝浩)

プロジェクトマネージャー(PM)：山本俊
「ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース」

(阪大、早大、OIST、NICT、浜松ホトニクス) 2020年~
量子プロセッサのネットワーク化



浜ホト:多チャンネル超伝導光子検出器の実装



量子インターネット構想

S. Wehner *et al.*, Science 362, 303 (2018).

Lv.5: Quantum Computing Networks

多数の論理量子ビットに対する
誤り耐性量子ゲート操作

例) 任意の量子アルゴリズム

Lv.4: Fault-Tolerant Few Qubit Networks

少数の論理量子ビットに対する
誤り耐性量子ゲート操作

例) 分散量子計算

Lv.3: Quantum Memory Networks

終端ノード間の量子もつれ生成
およびその量子演算

例) 秘匿量子計算、秘密分散量子暗号、
リーダー選挙、超長基線望遠鏡、時計同期

Lv.2: Entanglement Distribution Networks

終端ノード間に量子もつれ生成

例) MDI, DI量子鍵配送

Lv.1: Prepare And Measure

量子ビットの状態が終端ノード
に送信され、測定

例) 量子鍵配送 (量子暗号)

Lv.0: Trusted-Node Network

信頼・終端ノードで古典ビットを保存

例) 量子鍵配送 (量子暗号)

バックキャスト的
(Science first)



ギャップを埋める
研究プランが必要

JST-CREST
「グローバル量子ネットワーク」
2016年~2022年

量子鍵配送 (量子暗号)
ネットワーク



フォワードキャスト的
(Industry first)



<https://spectrum.ieee.org/chinas-2000km-quantum-link-is-almost-complete>

量子コンピュータ

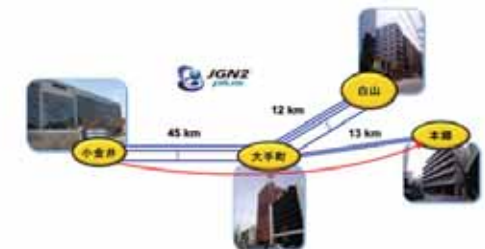


MS山本俊PM
「ネットワーク型量子
コンピュータによる量
子サイバースペース」
2020年~

ムーンショット研究開発事業
目標6 「2050年までに、経済・
産業・安全保障を飛躍的に発展さ
せる誤り耐性汎用量子コンピュ
ータを実現」

例)

A STRATEGIC VISION FOR
AMERICA S QUANTUM
NETWORKS
@2020年



Tokyo-QKD network
<http://www.uqcc.org/QKDnetwork/>



量子インターネットタスクフォース

QUANTUM
INTERNET
TASK FORCE

量子前提時代を創出する、量子インターネット全日本研究開発推進団体

<https://qitf.org/>

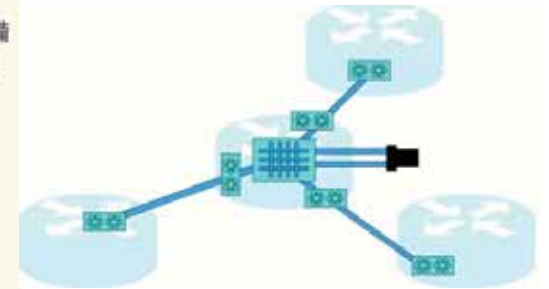
2019年設立
2021年コンソーシアム化

量子インターネットの白書

永山翔太、生田力三、小坂英男、
佐々木寿彦、高橋優樹、根本香絵、堀切智之、山崎歴舟、山本俊、Rodney Van Meter
「“The” 量子インターネット-この宇宙の物理法則に許されるサイバー空間の極致-」
(2021/2/10).

量子インターネットテストベッド計画 量子インターネットレイヤー構造・標準化

- Phase 1: フィールド環境調達・仕様調整
実験室でのスイッチング・通信光準備
- Phase 2: API実装・各機能のコンポーネント化
フィールド環境でのスイッチング
単リンクエンタングルメント配送
- Phase 3: フィールド環境での
ルーティング実証
(量子メモリなし)
- Phase 4: 量子メモリ付き



ホワイトペーパー
“The” 量子インターネット
この宇宙の物理法則に許されるサイバー空間の極致。

量子でネット安全性堅固に
メルカリや東京大学、大阪大学などの研究者らは...
日経新聞2021/3/8 11面、朝刊



量子インターネットの構造・要素技術

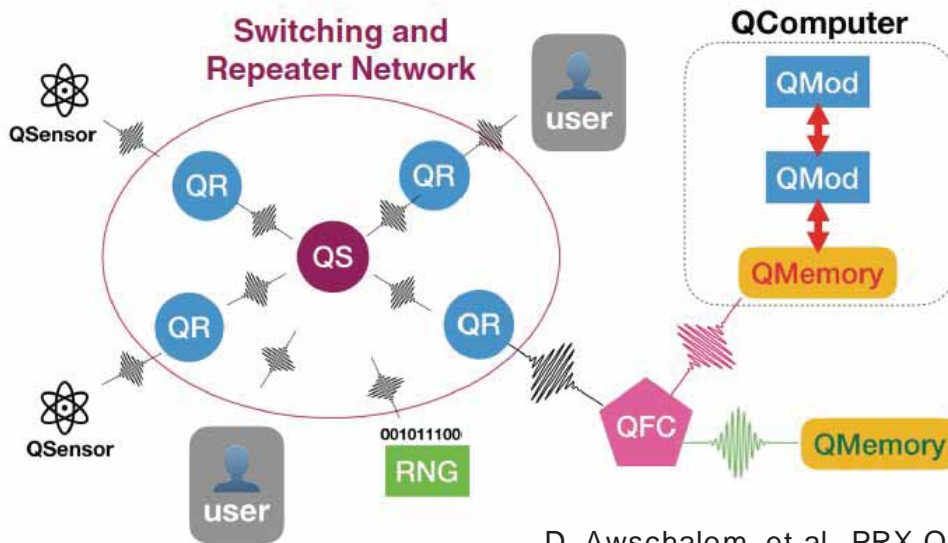


FIG. 1. The broad role of QuICs in quantum information technology. QS, quantum switch; QR, quantum repeater (a device that can relay an entangled state from one set of qubits to a distant set without physically sending an entangled qubit the entire distance); QMod, modular quantum processor; QFC, quantum frequency converter; RNG, random-number generator. The QuICs are indicated by bold red arrows or by wave packets representing photons.

重要な量子デバイス・技術

- ・量子プロセッサ
- ・量子メモリ
- ・光との量子インターフェース
- ・高速・低損失量子スイッチ
- ・多重化技術
- ・光子検出技術
- ・量子周波数変換

D. Awschalom, et al., PRX QUANTUM 2, 017002 (2021).

具体例

- ・量子限界の性能をもつ検出器：光子検出器（SPAD, 超伝導ナノワイヤ・TES等）、ホモダイン検出等
- ・超低損失光チャネル：光ファイバー、インターコネク技術、空間光伝搬、補償光学
- ・衛星を含む空間光学系と地上ネットワークの接続技術
- ・量子もつれ光源とその伝送、制御、測定技術：非線形光学媒質、ファイバー結合・モジュール化、偏光・遅延等の制御等
- ・光の空間、時間、波長（周波数）等を利用する多重化量子通信技術：光集積回路、DWDM、PLC等
- ・量子周波数変換：量子プロセッサ・量子メモリに対応する波長域、通信に対応する波長域、マイクロ波を含む量子コンピュータに関連した領域の量子状態を相互に変換等
- ・可視光または通信波長における光子の量子ビットと互換性のある量子メモリおよび量子プロセッサの開発
- ・これらを組み合わせた量子中継器を用いた長距離量子もつれ配送（地上および衛星）による小規模および大規模量子プロセッサ間の量子もつれベースの Protokol 実装

量子インターネットネットワークスタック

アプリケーション層(application) :

従来ネットワークと量子ネットワーク機能の両方を利用
任意の量子暗号プロトコル、分散型・秘匿量子計算、
量子センサーネットワーク等のプロトコルの実装

トランスポート層(transport) :

量子テレポーテーションを使用して量子ビットを送信する制御

ネットワーク層(network) :

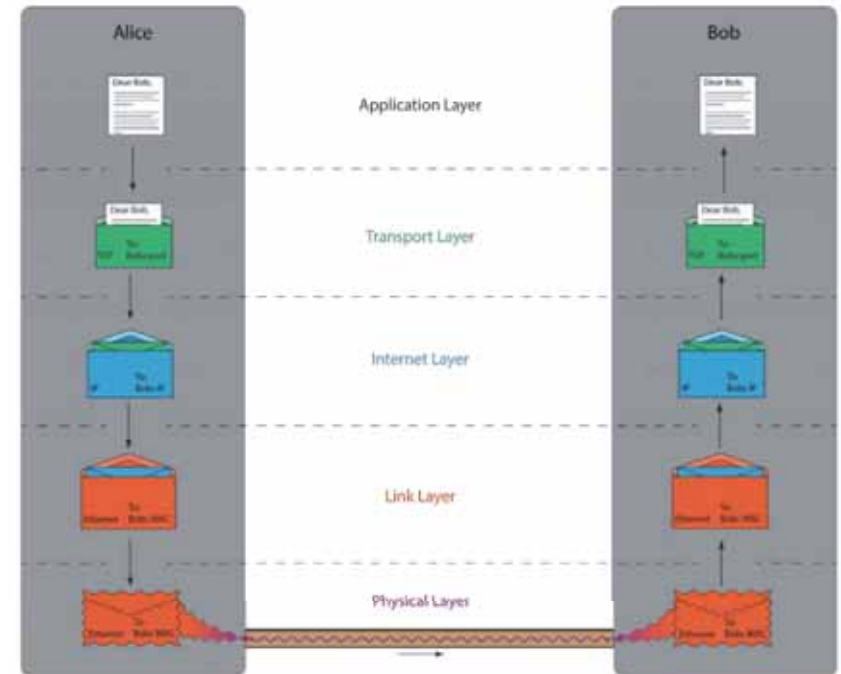
光ファイバ等で直接接続されていないノード間で
量子もつれスワッピングにより、長距離量子もつれ生成の制御

データリンク層(Data link) :物理層を動かす役割

離れた量子ノード間の量子もつれ生成の制御

物理層(Physical) :

量子デバイス(プロセッサやメモリ等)と光ファイバを含み、量子
情報を生成、操作、測定し、タイミングの同期等を実現

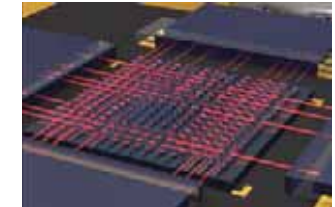
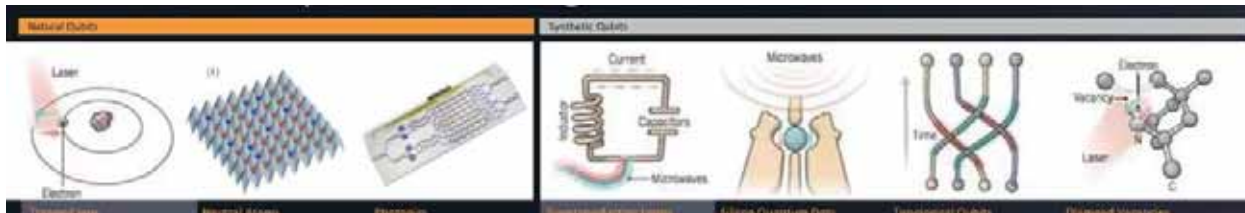


<https://blog.qutech.nl/2019/05/22/a-quantum-network-stack/>

物理層の量子デバイス (プロセッサ、メモリ)

光ファイバー/空間伝搬

光スイッチ



<https://www.servethehome.com/ionq-quantum-computing-at-hot-chips-33/>

<https://www.firefold.com/blogs/news/what-is-fiber-optic-cable>

<https://agiltron.com/category/optical-switches/mems-optical-switches-etmems/mems-switch-nxm/>

物理層の要素技術だけでなく

ミドル層 (データリンク、ネットワーク、トランスポート) やアプリケーション層の開発も重要



米国での研究動向

量子ネットワークの国家戦略「A STRATEGIC VISION FOR AMERICA S QUANTUM NETWORKS」
 @2020年2月 * 国家量子戦略 (National Quantum Initiative) に追加

In 1969, the Department of Defense's Advanced Research Projects Agency demonstrated the first network (ARPANET) that led to the internet we know today. Back then, one could hardly imagine that it would become **the world's most powerful driver for economic growth and quality of life**. As demonstrated once by ARPANET and now by A Strategic Vision for America's Quantum Networks and the NQIA, the Federal government has a critical role to play in driving early-stage QIS research and providing direction to national R&D efforts. Under the Trump Administration's leadership, **the United States will pioneer the quantum internet and ensure QIS discovery and innovation that benefits all Americans**.

例)	Q-NEXT	HQAN	CQN	Quantum Foundry
分野	量子センシング・量子通信・他	量子通信	量子通信	量子コンピュータ, 量子通信
内容	量子接続、ファウンドリ機能、テストベッド	異種量子システムの接続	材料とデバイス、中継プロセッサ、通信方式	トポロジカル材料とインターフェースを開発
機関	Argonne NL	U Illinois UC Brian DeMarco	U Arizona Saikat Guha	UC Santa Barbara Ania B. Jayich
金額	\$115 mn/5y (国以外+ \$93 mn)	\$25 mn/5y	\$26 mn/5y (op. + \$24.6 mn/5y)	\$25 mn/6y
参加機関	Caltech, Cornell, Northwestern, Pennsylvania State, Stanford, UC Santa Barbara, U Chicago, U Illinois, U Wisconsin	U Wisconsin, U Chicago, U Waterloo	Harvard, MIT, Yale, Brigham Young, Howard, N. Arizona U Massachusetts A, U Oregon U Chicago	Boston, U Pittsburgh, UC San Diego
パートナー企業	Applied Materials, Boeing, ColdQuanta, General Atomics, HRL Laboratories, IBM, Intel, Keysight Technologies, Microsoft, Quantum Opus, Verizon	IBM, Google, ColdQuanta, Toptica, American Family Insurance, AdvR, Northrop Grumman, Quantum Opus, Quibitekk, Xanadu, Microsoft, Quantum Technologies, Aliro, FlexCompute	Applied Materials, Raytheon BBN Technologies, PsiQuantum, Lockheed Martin, Corning, Xanadu, Bra-Ket Science, KCK Group, Osage Partners, Flybridge, General Dynamics	Bruker, Four Nine Design, GE, Google HP, Honeywell, HRL Laboratories, IBM, Intel, Microsoft, Nexus Photonics, Northrop Grumman, NVision, Oxford Instruments, Plasma-Therm, Quantum Machines, Soma Logic, ThermoFisher, Thorlabs Crystalline Solutions, TOPTICA Photonics, Western Digital, QED-C
政府系機関	SLAC NL, Pacific Northwest NL	Lincoln Lab, Air Force Research Lab, FermiLab	Sandia NL, NIST	-

The United States Innovation and Competition Act of 2021

Quantum Network Infrastructure and Workforce Development Act of 2021

2021/6/8 上院通過

総計 ~ 75億円/年@QIQB試算 (量子ネットワーク関連のみ)



量子インターネットテストベッド

物理層、ミドル層、アプリケーション層の実装

Long Island quantum network@2019-



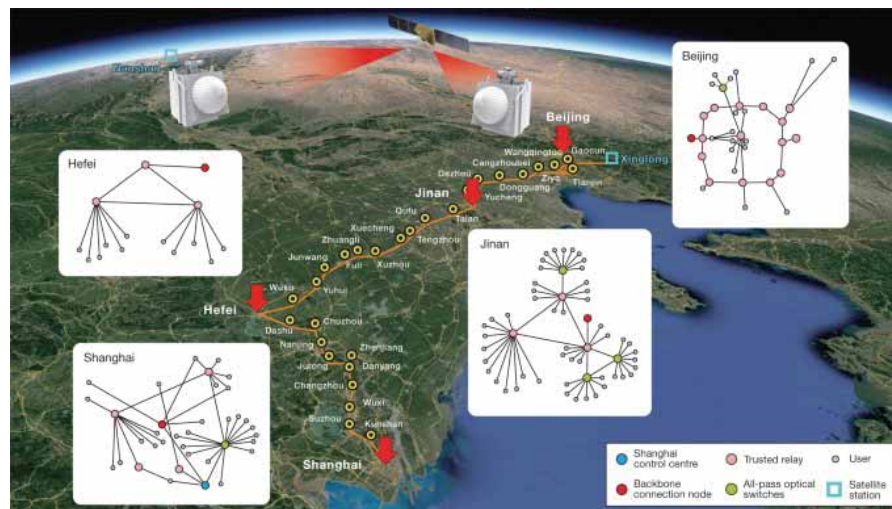
Figure 3.3. Long Island quantum network extended to New York City. The network will use a chain of quantum repeaters, extended across Long Island via three entangled sources, six quantum memories, and two entanglement swapping stations. Using ESnet's existing fiber infrastructure, the network will connect SBU to New York City via Brookhaven Lab with intermediate stations on the two campuses and in Garden City. NY. This is expected to be the first quantum repeater network of its kind in the world.

Argonne National Laboratory
the University of Chicago @2020



<https://www.anl.gov/article/argonne-and-uchicago-scientists-take-important-step-in-developing-national-quantum-internet>

Quantum Internet Alliance



USTC China

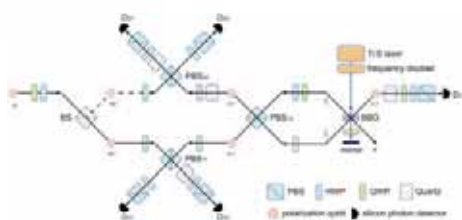
Nature 589,
214 219 (2021).

量子インターネットの副産物例

IOWN構想@NTT出版



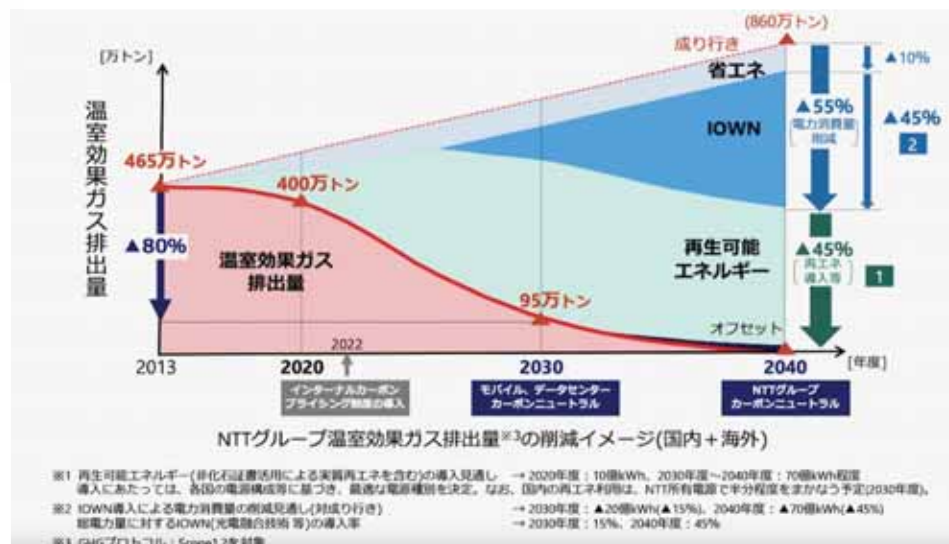
全光量子中継



Nature Communications, 10, 378, 2019.

阪大・NTT・富山大・トロント大の共同研究

光電変換のないオール光化による
カーボンニュートラル実現シナリオ



<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01537/00207/?SS=imgview&FD=-760280163>

量子インターネットの要素技術の特徴: 極限的な量子デバイス

例) 一つ一つの光子/原子で情報処理・通信

極限低損失デバイス

極限効率量子インターフェース/変換技術 極限効率“光電”変換・検出技術

量子インターネットの要素技術は極限的に効率的デバイス



オール光でも、光電変換ありでもカーボンニュートラルへ貢献
超省エネルギーデバイス・通信、セキュリティ対策コストの削減など

研究体制：海外有力グループ[例]

Rempe group @ Max Planck/QIA



Director: G. Rempe
GL: S. Dürr, A. Reiserer
Staff/Posdoc/Tech. (11)
Ph.D (16)
Master (8)
Total (38)

<https://www.mpq.mpg.de/4987954/staff>

Lukin Group @ Harvard

<https://lukin.physics.harvard.edu/>



GL: M. Lukin
Affiliated Scholars (3)
Postdocs (10)
Research Scholars (2)
Students (40)
Total (56)

QuTech (Project Managers (5) Management Staff (25)) <https://qutech.nl/>

Hanson group



GL: R. Hanson
Staff/Posdoc/Tech. (5)
Ph.D (12)
Master (5)
Total (23)

Wehner Group



GL: S. Wehner
Staff/Posdoc/Tech. (2)
Ph.D (12)
Master (5)
Total (20)

Tittel group



GL: W. Tittel
Staff/Posdoc/Tech. (4)
Ph.D (2)
Master (0)
Total (7)

Elkouss Group



GL: D. Elkouss
Ph.D (4)
Master (1)
Total (6)

他4グループ

1グループが大規模

小規模グループの
有機的集合体

海外と競争力のある研究体制の構築は急務