วาระที่ ๓.๒

ความร่วมมือไทย-สิงคโปร์เรื่องนาฬิกาอะตอม* เพื่อพัฒนากำลังคนและการวิจัยพัฒนา

ตามพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี
(ประจำปี ๒๕๖๔)

รายงานเมื่อ
๑ มีนาคม ๒๕๖๕

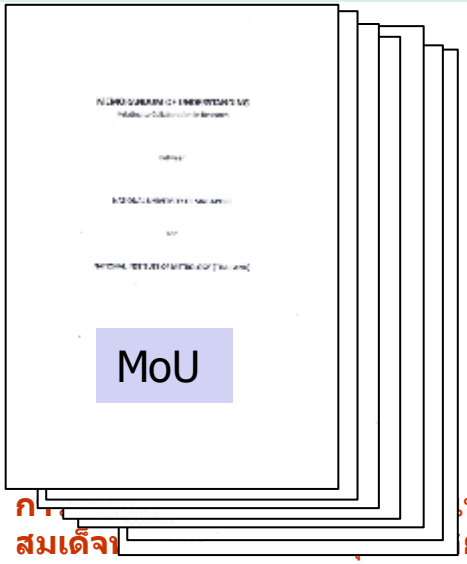
หน่วยงานร่วมโครงการ
1. มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริฯ
2. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
3. มหาวิทยาลัยมหิดล
4. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
5. Centre for Quantum Technologies, Singapore
6. National Institute of Information and Communication Technology, Japan
7. Quantum Technology Foundation Thailand

*ชื่อเต็มคือนาฬิกาอะตอมเชิงแสงด้วยไอออนเย็นของธาตุอิธเธอเบียม

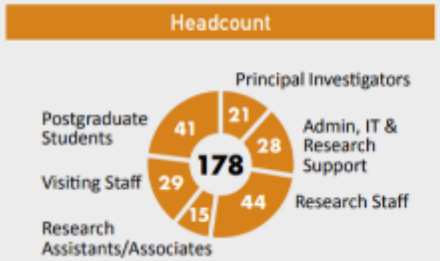
1.ศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม (Centre for Quantum Technologies :CQT) มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์(NUS)

- ก่อตั้งเมื่อธันวาคม ค.ศ.2007 เพื่อเป็นศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติแรกของสิงคโปร์ ตั้งอยู่ในพื้นที่มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS)
- ภารกิจมุ่งเน้นการพัฒนาบุคคลากรในสาขาเทคโนโลยีควอนตัมเพื่อสนับสนุนงานวิชาการและภาคอุตสาหกรรม และงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม 3 ด้าน คือ
  - ✓ **Quantum Communication & Security**
  - ✓ **Quantum Computation & Simulation**
  - ✓ **Quantum Sensing & Metrology**
- บุคลากร 178 คน เป็นนักวิทยาศาสตร์และนักศึกษา 150 คน
- งบประมาณปีละราว 716 ล้านบาท

เมื่อ 20 มกราคม 2562 สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม ระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT: National Institute of Metrology of Thailand)กับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS : National University of Singapore)

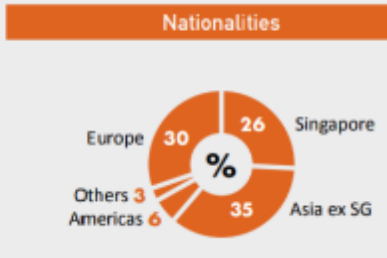


ภาพในห้องปฏิบัติการนาฬิกาอะตอมของ CQT



Count of CQT staff and students as of 31 December 2019

CQT also hosted in 2019 a total of 91 visitors and 39 interns



Nationalities of CQT staff and students as of 31 December 2019

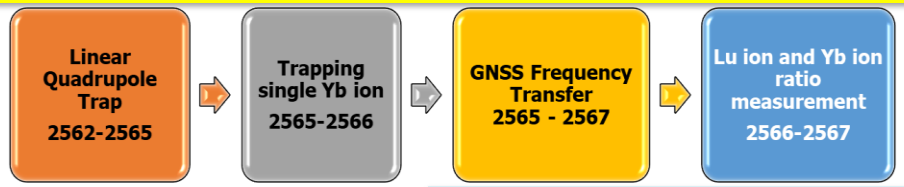
	Manpower	Equipment	Other	Total
Core Funding	10.23	1.04	8.34	19.61
Competitive Grants	1.98	0.66	1.79	4.43
Total	12.21	1.70	10.13	24.04

All figures in million SGD.

ก[illegible]ชดาร
สมเด็จพ[illegible]ยามบรมราชกุมารี วันที่ 1 มีนาคม 2565

2. แผนความร่วมมือ NIMT-CQT ในการพัฒนานาฬิกาอะตอมเชิงแสง(1/2)

ในปี64ได้ปรับแผนเนื่องจาก COVID-19 โดยงดการแลกเปลี่ยนนักศึกษากับCQTไปก่อน



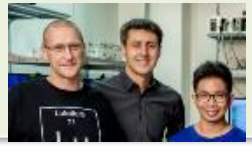
- ระยะเวลาดำเนินการ 7 ปี (2562-69)
- งบประมาณทั้งโครงการ 83.38 ล้านบาท
- **อนุมัติแล้ว 4 ปี(62-65)จำนวน 34.22 ล้านบาท**

วัตถุประสงค์ เพื่อใช้เป็นนิยามของหน่วยวินาทีในอนาคตของประเทศไทย รวมทั้งการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีควอนตัม

- NIMT ใช้ไอออนของธาตุอิธเธอเบียม (Yb^+)
- CQT ใช้ไอออนของธาตุลูทิเทียม (Lu^+)

นักวิจัยไทย

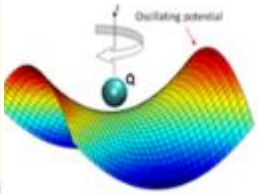
- ดร. ปิยพัฒน์ พูลทอง NIMT
- ดร. ธเนศ พฤทธิวรสิน ม.มหิดล
- ดร. ธารา เฉลิมทรงศักดิ์ ม.มหิดล
- ดร. รัฐกร แก้วอ่วม มทส (จบป.เอกจาก CQT/NUS)
- นายนครินทร์ จายโจง จบป.โท ม.มหิดล ขณะนี้เรียนป.เอกที่NUS(CQT)ด้าน Quantum Science with Strontium



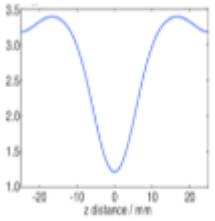
นักวิจัยสิงคโปร์

- Dr. Murray Barrett CQT

- **ปี 2562 – 2565** ร่วมวิจัยและสร้างอุปกรณ์กักขังไอออนของธาตุอิธเธอเบียม (Yb+) ซึ่งเป็นหัวใจของนาฬิกาอะตอมที่ NIMT
  - ปลายปี 2562 ร่วมพัฒนาเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางทองคำบนแผ่นเซรามิคอะลูมินาไนไตรด์ที่ CQT ที่สิงคโปร์แต่ไม่สมบูรณ์
  - ปี 2563 ไม่สามารถส่งนักศึกษาทุนปริญญาโท(พสวท)ไป CQTได้ เพราะCOVID-19ต้องเลื่อนไปหลังสถานการณ์ดีขึ้นแล้ว
  - ปี2563 พัฒนาชั้นทองแดงบนแผ่นเซรามิคMACORเองในไทยเอง
  - ปี2564 สร้างชิ้นส่วนเพิ่มเติมเพื่อให้ได้หน่วยกักขังไอออนอิธเธอเบียม
- **ปี 2565-2566** ทดลองการกักขังไอออนอิธเอเบียม
- **ปี 2565 – 2567** ติดตั้งระบบดาวเทียมนำทาง GNSS (Global Navigation Satellite System) ที่CQT เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ของนาฬิกาอะตอมระหว่างNIMT (มีGNSSแล้ว) และ CQT
- นอกจะนี้จะเจรจาขยายความร่วมมือไปยัง NARIT (ไทย) และ NICT (ญี่ปุ่น) เพื่อใช้ระบบ VLBI (very large base interferometer) ในการเปรียบเทียบความถี่เพื่อให้แม่นยำมากกว่าระบบGNSS
- **ปี 2566 – 2567** ทำการวัดความถี่ของนาฬิกาอะตอมเชิงแสงของทั้ง 2 หน่วยงานซึ่งทั้งสองธาตุนี้คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดมาตรฐานหน่วยวินาทีใหม่ของโลกในอนาคต
- **ในปี 2569** จะเริ่มมีพิจารณานิยามใหม่ของหน่วยวินาที



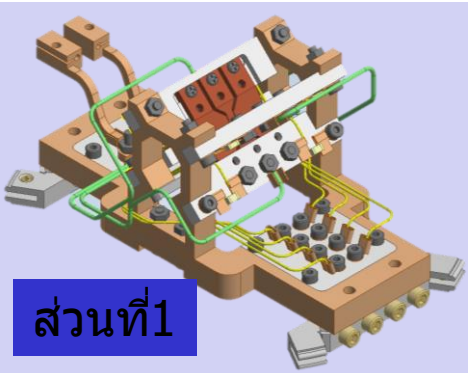
RF field ทำให้เกิดหลุมพลังงานศักย์แบบพาราโบลาในแนวรัศมี ทำให้ไอออนถูกกักขังอยู่ที่กันหลุมหรือบริเวณตรงกลาง



DC field ทำให้เกิดหลุมพลังงานศักย์แบบพาราโบลาในแนวยาว ทำให้ไอออนถูกกักขังบรเวณตรงกลาง

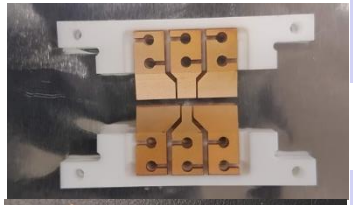
การทำงานเริ่มจาก(1)**การกักขังไอออน(Linear quadrupole Trap)**ของอิธเธอเบียมด้วยสนามไฟฟ้าให้อยู่ที่อุณหภูมิใกล้ศูนย์องศาเคลวิน (2)ใช้เลเซอร์ที่ความถี่พอเหมาะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของไอออนนี้เปลี่ยนสถานะไปมาระหว่างชั้นพลังงานที่เรียกว่าSและDความถี่ของเลเซอร์นี้จึงเป็นนาฬิกาที่แม่นยำตามต้องการ

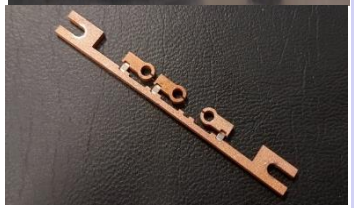
3. ความก้าวหน้าในการวิจัยพัฒนา Atomic Clock ในปี 2564(1/2)



ส่วนที่1

อุปกรณ์สำหรับกักขังไอออนของประเทศไทย ซึ่งได้ถูกออกแบบและสร้างชิ้นส่วนทั้งหมดขึ้นในประเทศไทย





ชิ้นงานเซรามิคที่มีความแม่นยำสูงโดยการผลิตของวิสาหกิจเริ่มต้น (startup)ในประเทศ
Tolerance: 50 μm

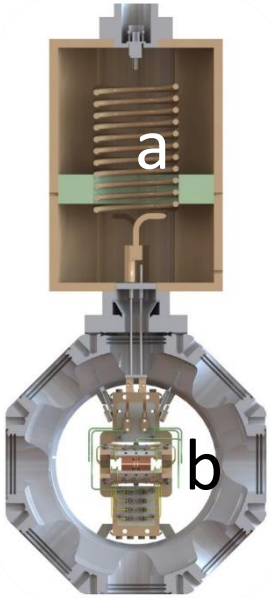
ชิ้นส่วนทองแดงไร้ออกซิเจนผลิตขึ้นโดยเครื่อง Wire cut EDM ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
Tolerance: 10 μm

ส่วนที่2

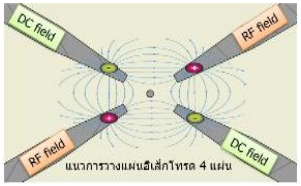
ติดตั้งระบบเลเซอร์ และระบบที่ใช้ในการรักษาความถี่ของเลเซอร์ (a)เพื่อใช้ในการทำให้ไอออนเย็น (Laser cooling)(b)วัดความถี่ออกมาด้วย

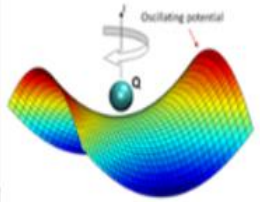
ส่วนที่3

ภาพจากคอมพิวเตอร์แสดงการติดตั้ง **(a)** อุปกรณ์ขยายสัญญาณความถี่ (Helical Resonator) เพื่อใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อกักขังไอออนใน **(b)**อุปกรณ์กักขังไอออนในระบบสูญญากาศ



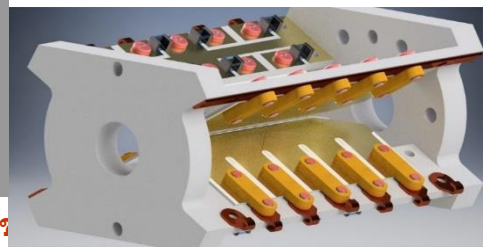
การทำงานต้องอาศัยทั้ง3ส่วนทำงานร่วมกัน
(i) อุปกรณ์ขยายสัญญาณความถี่ทำหน้าที่ป้อนความถี่ให้ (ii) อุปกรณ์กักขังไอออนเปลี่ยนสนามไฟฟ้าไปมาจนกักขังไอออนได้ (iii) เลเซอร์ช่วยทำให้ไอออนเย็นลงและเข้าไปอยู่ในอุปกรณ์กักขังได้ นอกจากนี้เลเซอร์ยังช่วยทำให้ไอออนเปลี่ยนสถานะเกิดความถี่ของนาฬิกานำออกไปใช้งานภายนอกได้ด้วย



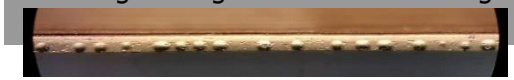


เปรียบเทียบอุปกรณ์กักขังไอออนระหว่างNIMTและCQT

Designed by NIMT
Electrode: OFHC(oxygen-free high thermal conductivity)
Holder: MACOR
Electrode to ion distance: 500 μm
Challenge: Roughness of polished Cu



Designed by CQT
Electrode: Alumina Nitride
Holder: MACOR
Electrode to ion distance: 500 μm
Challenge: Roughness of Gold coating



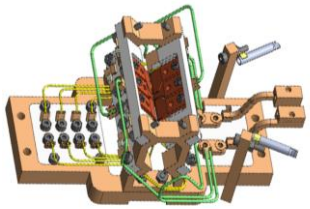
3. ความก้าวหน้าในการวิจัยพัฒนา Atomic Clock ในปี 2564 (2/2)

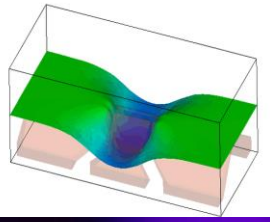
3.1 ความก้าวหน้ารวมในแต่ละระบบจนปัจจุบัน 2564

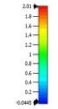
FPGA based Experimental Control
Pulse Sequencer: 4ns resolution
Direct Digital Synthesizer: 200pHz resolution

PID Laser stabilization
External Cavity Diode Laser
Doppler Free Dichroic Atomic Vapor Laser Lock

Linear Quadrupole Trap
In-house technology
Electrical field simulation







Utra-high Vacuum
Fluorescence of Ytterbium atom 398.911 nm
Vacuum pressure below 1E-10 mbar

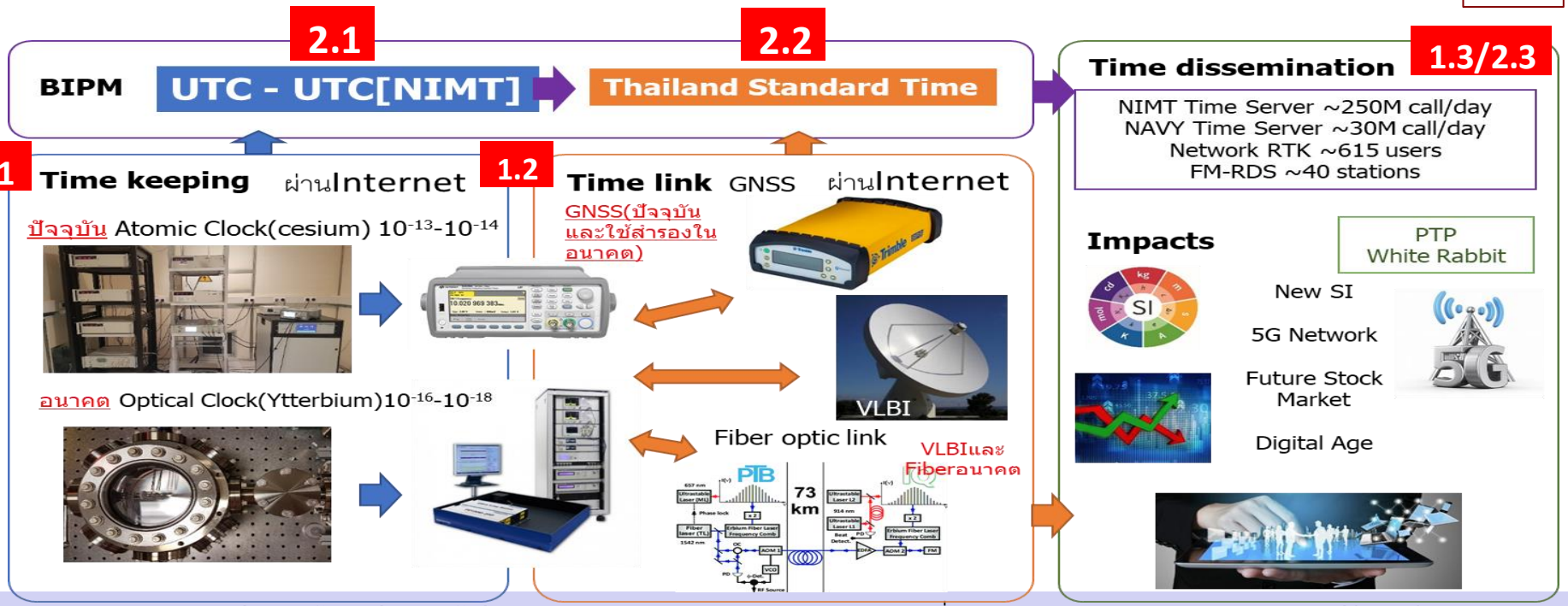
3.2 ผลที่คาดว่าจะได้รับ : Atomic Clock ที่แม่นยำกว่าปัจจุบัน

Present definition (2019)
Research
Cesium Fountain Clock: 10^{-16}
Commercial product
Cesium beam atomic clock: 10^{-13}-10^{-14}

Proposed definition (2026)
Research
Optical Clock: 10^{-16}-10^{-18}
CODATA 2026
NIMT value: Ytterbium ion frequency standard

หมายเหตุ:Committee on Data for Science and Technology, publishers of the CODATA recommended values of physical constants

4.กลไกการผลิตระบบเวลามาตรฐานประเทศไทยโดยใช้ Atomic Clock



1. ระบบเวลามาตรฐานประเทศไทยประกอบไปด้วย (1.1) ระบบการรักษาเวลาและความถี่ (Time Keeping) (1.2) ระบบการเปรียบเทียบเวลาและความถี่ (Time Link) และ (1.3) ระบบการถ่ายทอดเวลาและความถี่ (Time Dissemination)
2. ในการทำงานนั้น (2.1) เวลาและความถี่ของ Atomic Clock ไทยและเวลาไทยเทียบกับGNSS ทั้งสองข้อมูลนี้ผ่านinternetไปคำนวณผลต่าง UTC (สากลที่BIMP)-UTC(NIMT) ซึ่งปกติจะต่างราว 100 นาโนวินาที (2.2) นำผลต่างมาแก้ไข Atomic clock ไทยแล้วบวกด้วย 7 ชม. ทำให้ได้เวลามาตรฐานไทย(Thailand Standard Time) แล้วจึง (2.3)ส่งผลให้หน่วยงานต่างๆ ผ่าน Time dissemination ไปใช้ได้
3. ปัจจุบันไทยใช้นาฬิกาอะตอมซีเซียมมีความถูกต้องประมาณ $10^{-13} – 10^{-14}$ ใน1วินาทีและผ่านระบบดาวเทียมนำทาง(GNSS : Global Navigation Satellite System)
4. อนาคตเมื่อนาฬิกาอะตอมอิธเธอเบียมสำเร็จจะเพิ่มความถูกต้องเป็น $10^{-16} – 10^{-18}$ ใน 1 วินาที และผ่านVLBI และFiber opticsที่สัญญาณรบกวนต่ำกว่า
5. ปัจจุบันมี (1) การขอปรับเทียบเวลาจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติประมาณวันละกว่า 250 ล้านครั้ง/วัน (2) กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือประมาณ 30 ล้านครั้ง/วัน (3) ระบบระบุพิกัดด้วยระบบดาวเทียมนำทางซึ่งต้องใช้ค่าชดเชยเวลาเพื่อเพิ่มความแม่นยำมีจำนวนผู้ใช้งานประมาณ 615 ราย และระบบการกระจายเวลามาตรฐานไทยผ่านสถานีวิทยุจำนวน 40 สถานี ซึ่งจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นทุกปีอย่างมีนัยยะสำคัญเพราะการใช้งานระบบการทำธุรกรรมออนไลน์และระบบการสื่อสารต่างๆ เติบโตอย่างก้าวกระโดด

หมายเหตุ: (1)การคำนวณเวลามาตรฐานสากลเชิงพิกัด (Coordinated Universal Time, UTC) ทำณ สำนักงาน ชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (BIPM:Bureau International des Poids et Measures) ประเทศฝรั่งเศส(2)PTP White Rabbit ระบบเวลาสำหรับเครื่องเร่งอนุภาค

5.สรุป

1. เมื่อ 20 มกราคม 2562 สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราช ดำเนินไปยังศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม (CQT) มหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ ทรงเป็นประธานในการลงนามความร่วมมือด้านการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัมระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติกับมหาวิทยาลัยแห่งชาติสิงคโปร์ (NUS)
2. CQT เน้นการพัฒนาบุคคลากรในสาขาเทคโนโลยีควอนตัมเพื่อสนับสนุนงานวิชาการและภาคอุตสาหกรรม และงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม 3 ด้าน คือ Quantum Communication Quantum Computing และ Quantum Metrology/Precision Measurement
3. ทั้งสองประเทศจะร่วมกันวิจัยและพัฒนานาฬิกาอะตอมเพื่อใช้เป็นนิยามของหน่วยวินาทีในอนาคตของประเทศไทย รวมทั้งการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีควอนตัมระยะเวลา 7 ปี งบประมาณฝ่ายไทย 83.38 ล้านบาท
4. สิ่งที่ประเทศไทยได้รับคือ (4.1) การกำหนดนิยามของหน่วยวินาที (4.2) งานวิจัยไทยเป็นที่ยอมรับในเวทีนานาชาติ (4.3) สร้างบุคลากรที่มีคุณภาพและศักยภาพทัดเทียมนานาชาติ (4.4) นาฬิกาอะตอมเชิงแสงจะเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญให้กับประเทศไทย ในด้านสื่อสาร (5G network) ระบบธุรกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Financial Technology) ระบบโครงข่ายพิกัดหมุดหลักฐานแห่งชาติ เป็นต้น
5. นาฬิกาที่พัฒนาใหม่นี้จะแม่นยำกว่านาฬิกาซีเซียมของประเทศในปัจจุบันถึง 10,000 เท่าให้ประโยชน์หลากหลายแก่หน่วยงานต่างๆ ในประเทศไทย
6. ผลกระทบ COVID-19 ทั้งใน ปี 2563 และ 64 จำเป็นต้องปรับแผนโดยงดการแลกเปลี่ยนนักศึกษาระหว่าง NIMT และ CQTไปก่อน อย่างไรก็ดียังรักษาว่าจะสำเร็จใน ปี 2567
7. ผลกระทบเนื่องจาก COVID-19 ทำให้ NIMT ต้องวิจัยพัฒนาอุปกรณ์กักขังไอออนอิเธอเบียมขึ้นมาเองในประเทศ และจะทำการเปรียบเทียบกับของ CQT ในสิงคโปร์

ประเด็นเสนอที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงาน ปี 2564
และเห็นชอบแผนการดำเนินงาน ปี 2565