



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการการพัฒนาหัวใจไอออนสำหรับผลิตบีมรวม อาร์กอน

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรพรรณ บุญญาวรณ และคณะ

พฤษภาคม 2546

สัญญาเลขที่ RDG4530033

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

# โครงการการพัฒนาหัวใจไอออนสำหรับผลิตปิโตรเคมี อาร์กอน

ผศ. ดร. อธิวรรณ บุญญวรรณ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อ. มิณห์ เมธีสุกุล	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
นาย ไมเคิล ไรตส์	สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
นายราเชนทร์ เจริญกุล	สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชุดโครงการพัฒนาเซลล์แสงแดดไทย

## Executive summary

- Project code : RDG4530033
- Project title : Ion source for Argon combined beam production
- Investigator : Asst. Prof. Dr. Dheerawan Boonyawan  
Fast Neutron Research Facility  
Physics Department, Science Faculty  
Chiang Mai University  
Chiang Mai, 50200  
Tel: 053943379 Fax: 053222776
- E-mail address: [dherawan@chiangmai.ac.th](mailto:dherawan@chiangmai.ac.th)
- Project period : 10 months
- Objectives : - To develop a symmetrical-multi micron sized Argon beam source.  
- To develop electromagnetic dipole magnets as beams combiner.
- Methodology: - Design and develop an ion source for 16-20 micron-beam exits production.  
- Design and develop beam profiling system to measure beam size and current.  
- Design and develop a ring electromagnetic dipole magnets as a beam combiner.
- Results: In phase 1A, a multicusp rf ion source has been developed as multi Argon beam sources. The source with plasma density over  $30 \text{ mA/cm}^2$  was constructed and tested. The beam energy spread have been observed to vary from 3-5 eV in kV extraction ranges. The canonical convergent beam approach and coaxial cylindrical electrode (CCE) technique were utilized for space charge effect reduction in the focused beam. The CCE was designed using Ray Tracing program and the conical convergent multiple beam tests have been performed.  
The dipole field beam combiner and a multi ‘cigar’ type dc ion source working as micron size, mA range Argon beam sources have been developed in phase 1B. The source will be operated at 0.1 Torr Argon pressure and excited with 2.45 GHz microwave. The plasma density of up to  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  can be achieved from this type of plasma source
- Conclusions : The 20 beam exits ‘cigar’ type ion source has been designed and constructed. The source will be operated at 0.1 Torr Argon pressure and excited with 2.45 GHz microwave. The electromagnet dipoles for 20 beams combiner has been designed.
- Suggestions : It is need to further develop this ion source and test its performance.
- Keywords : microwave 2.45 GHz, electromagnet dipole

## ABSTRACT

The multicusp rf ion source, a large area with promising plasma uniformity ion source has been constructed. The source can provided multi Argon beam of keV, millimeter beams. The beams will be focused using a Coaxial cylindrical electrode (CCE). The test have been done on 4 Argon beams with 1mm beam size 300 uA beam current and 25 keV beam energy. The result shows a diverging focused beam

The dipole beam focussing technique has also been performed on the same setup with good results. In order to reach the goal of milliamps-micron size focused beam, a multi 'cigar' type dc source has been developed. . The source will be operated at 0.1 Torr Argon pressure and firstly excited with 2.45 GHz microwave. The 20 beam exits 'cigar' type ion source has been constructed. And the electromagnet ring dipoles for 20 beams combiner has been designed.

## บทคัดย่อ

คณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาหัวจ่ายไอออนแบบ multicusp rf ion source ด้วยข้อดีที่เป็นหัวจ่ายขนาดใหญ่ที่มีความสม่ำเสมอของพลาสมา สามารถผลิตบีมอาร์กอนแบบหลายลำสมมาตรที่มีกระแสสูง ขนาดเรื่อนมิลลิเมตร พลังงานระดับ keV เพื่อทำการโฟกัสเข้าหากันด้วยสนามไฟฟ้าชนิด Coaxial cylindrical electrode (CCE) หัวจ่ายสามารถผลิตบีมอาร์กอนขนาด 1 มม. มีกระแส 300 ไมโครแอมป์ พลังงาน 25 keV จากการทดสอบด้วย CCE พบว่าสามารถรวมบีม 4 ลำเข้าด้วยกันแต่บีมค่อนข้าง diverge

ต่อมาจึงพัฒนาระบบรวมบีมอาร์กอนหลายลำด้วยสนามแม่เหล็ก การทดลองด้วยสนามไดโพลจากแม่เหล็กถาวรให้ผลดี เพื่อให้บีมเริ่มต้นมีกระแสที่สูงเรื่อนมิลลิแอมป์และมีขนาดบีมเรื่อนไมโครเมตร คณะผู้วิจัยจึงเปลี่ยนมาพัฒนาหัวจ่ายไอออนแบบ cigar type dc source เพื่อผลิตบีมอาร์กอนเรื่อนไมโครเมตรกระแสสูง โดยการดีสชาร์จด้วยไมโครเวฟ 2.45 GHz หัวจ่ายได้ถูกพัฒนาขึ้นมี 20 รูเปิดบีมขนาด 200 ไมครอน โดยระบบรวมบีมแบบแม่เหล็กไฟฟ้าไดโพลอยู่ระหว่างการออกแบบ

# สัญญาเลขที่ RDG4530033

## โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาหัวจ่ายไอออนสำหรับผลิตบีมรวมอาร์กอน รายงานฉบับสมบูรณ์

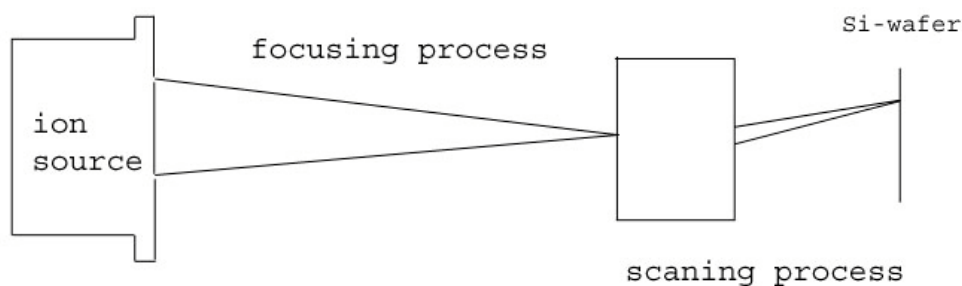
--

รายงานในช่วง : 1 สิงหาคม 2541 – 31 พฤษภาคม 2546  
หัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. ชีววรรณ บุญญวรรณ  
หน่วยงาน : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การวิจัยของคณะวิจัยระหว่างปี 2541-2543 (เฟส 1A) มุ่งเน้นที่การพัฒนาหัวจ่ายไอออนแบบ multicusp rf ion source เพื่อใช้ผลิตบีมอาร์กอนกระแสสูง เร็วนมิลลิเมตร พลังงานระดับ keV หลายลำ เพื่อทำการโฟกัสเข้าหากันด้วยสนามไฟฟ้า<sup>(1)</sup> เป็นการหาแนวทางที่เหมาะสมที่จะรวมบีมเข้าด้วยกัน สำหรับเฟส 1B นี้ (2544-2545) มุ่งเน้นที่พัฒนาระบบรวมบีมอาร์กอนหลายลำด้วยสนามแม่เหล็ก ก่อนที่จะเปลี่ยนมาพัฒนาหัวจ่ายไอออนแบบ cigar type dc source เพื่อผลิตบีมอาร์กอน เร็วนไมโครเมตร ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

### 1. แผนการดำเนินงาน

การโฟกัสบีมอาร์กอนขนาดเล็กระดับไมครอนให้รวมกันเป็นบีมเดี่ยวความเข้มสูง มีกระบวนการที่สามารถแสดงดังรูปข้างล่างนี้



เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการรวมลำหลายลำเข้าด้วยกัน จำต้องยึดหลักสำคัญ 3 ข้อนี้ไว้คือ

1. บีมนิ่งตั้งต้นจากหัวจ่ายไอออนควรมีขนาดเล็กระดับไมครอน การดึงบีมนิ่งจากระดับ 100-1000 ไมครอนต้องอาศัยการจำลองเพื่อดูพฤติกรรมของบีมนิ่ง รวมถึงการจัดวางอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการดึงบีมนิ่งออกจากหัวจ่ายก่อน
2. บีมนิ่งตั้งต้นต้องมีค่า emittance ต่ำ ทำให้บีมนิ่งรวมมีค่า emittance ต่ำด้วย ซึ่งต้องอาศัยการแต่งลักษณะของอิเล็กโทรดช่วยให้บีมนิ่งมีค่า emittance ต่ำและ
3. บีมนิ่งตั้งต้นมีกระแสไอออนสูงระดับ mA หรือใกล้เคียงและพลังงานต่ำ ปัญหาเรื่องดึงบีมนิ่งกระแสสูงจากหัวจ่ายขนาดเล็กเป็นเรื่องที่ยากในการปฏิบัติ โดยเฉพาะกับหัวจ่ายแบบ multicusp ที่ใช้อยู่ นอกจากนี้การใช้พลังงานต่ำระดับ 1-2 keV ทำให้บีมนิ่งมีค่า emittance ที่สูงขึ้นไปอีก
4. การหักเหบีมนิ่งตั้งต้นหลายลำมารวมกัน จะใช้เทคนิคของแม่เหล็กไดโพลเบนบีมนิ่งให้เข้ารวมกันที่จุดๆหนึ่งเรียกว่า จุดโฟกัสของบีมนิ่งทั้งหมด ในที่นี้จะทำการจำลองสนามแม่เหล็กเพื่อดูผลของสนามต่อการเบนบีมนิ่ง

ดังนั้นจึงได้จำลองบีมนิ่งตั้งต้นจากหัวจ่ายและใส่สนามแม่เหล็กไดโพล ขวางทางเดินของบีมนิ่ง ให้แก่โปรแกรม KOBRA3-INP ทำการจำลองบีมนิ่งอาร์กอนตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

#### Beam

- 0.5 - 1.5 keV argon beam
- 1 mA beam current
- Beam size 1 mm diameter

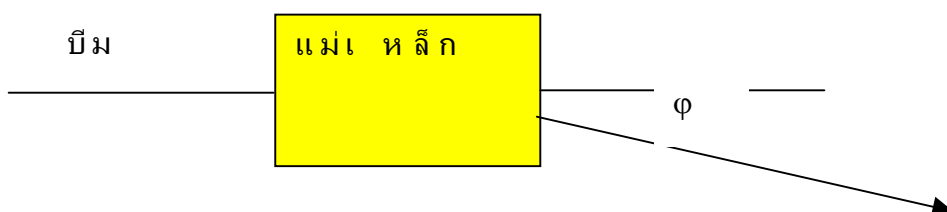
#### Field

- 1.0 Tesla dipole field,
- permanent magnet size : 38x10x12.5 mm

เราใช้แม่เหล็กถาวรรูปเหลี่ยมทำการเบนบีมนิ่งในเบื้องต้น ทั้งนี้อาศัยความสัมพันธ์<sup>[2]</sup>

$$Bl / \varphi = 2.88 \times 10^{-2} \quad \text{Tesla m/rad}$$

สำหรับบีมนิ่งอาร์กอน พลังงาน 1 keV โดย  $\varphi$  คือมุมเบน  $l$  เป็น path length สมมติให้  $\varphi = 0.5$  rad จากที่กำหนดสนาม  $B$  เป็น 1 เทสลา จะต้องมี path length ประมาณ 1.5 ซม. จากที่กำหนดให้แม่เหล็กมีความยาว 3.8 ซม. จึงสามารถลดค่าสนามแม่เหล็กไดโพลลงได้อีกเล็กน้อยในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ค่าความชันของการรวมบีมนิ่ง ณ จุดโฟกัสอาจต้องมีค่าน้อยๆ เพื่อให้เกิดการรวมกันของบีมนิ่ง ไม่ใช่การตัดกันของบีมนิ่ง



## 2. ผลการจำลอง

เพราะการจำลอง beam และ field สามารถทำได้พร้อมกัน ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใส่ให้โปรแกรมทำการจำลองบีม ส่วนตารางที่ 2.2 แสดงโปรแกรมคำนวณค่าสนามแม่เหล็กเพื่อเป็นข้อมูลเข้าให้กับโปรแกรมจำลองอีกที ผลการจำลองดังได้แสดงรูปที่ 2.1-2.6 ตามลำดับ โดยค่าพลังงานของบีมตั้งแต่ 0.5-1.5 keV ส่วนรูปที่ 2.7 แสดงผลการจำลองบีมอาร์กอน 4 ลำใน 3 มิติ จะเห็นได้ว่านอกจากจะเบนบีมได้มุมตามที่ได้คำนวณคร่าวๆไว้ก่อนแล้วแม่เหล็กไดโพลยังมีผลให้เกิดการโฟกัสในบางแกน รูปที่ 2.8 แสดง emittance ของบีมอาร์กอนพลังงาน 1 keV ลำหนึ่ง ณ จุดรวมบีมจากรูปสามารถบอกได้ว่าบีมมีการโฟกัสและมีค่า emittance ต่ำเพียง 5.4 mm mrad เท่านั้น สำหรับในรูปที่ 2.9 แสดงขนาดบีมทั้ง 4 ลำ ณ ตำแหน่งเลยจุดรวมบีมไปเล็กน้อย จะเห็นว่าบีมแต่ละลำมีการโฟกัสในบางแกนและบานออกในแกนตรงข้าม อันเป็นพฤติกรรมปกติของบีมที่ถูกหักเหโดยสนามแม่เหล็กแบบไดโพล

## 3. ระบบดึงบีมและเบนบีม

เราได้ทดลองสร้างระบบดึงบีมอาร์กอนแบบ 3 อิเล็กโทรด ฐเปิดบีมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม. จำนวน 4 ฐอยู่ในแนววงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการกระจายที่สม่ำเสมอของพลาสมาในหัวจ่ายดังที่ได้รายงานไว้ในภาคก่อน<sup>[1]</sup> โดยขนาดและระยะต่างๆมีค่าตามที่ได้จากการจำลอง รูปที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของแบบระบบดึงบีมและเบนบีม สำหรับรูปที่ 3.2 เป็นภาพถ่ายระบบเบนบีมด้วยแม่เหล็กไดโพลที่ได้ประกอบแล้วเสร็จ ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กมีขนาด 1.5 มม. การทดลองดึงบีมอาร์กอนจากระบบนี้จะได้กระทำในระยะต่อไป

### 3.1 การทดสอบระบบดึงบีมและเบนบีม

จากระบบดึงบีมอาร์กอนแบบ 3 อิเล็กโทรด ฐเปิดบีมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม. จำนวน 4 ฐอยู่ในแนววงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. ที่ได้รายงานไว้ในรายงานความก้าวหน้าเทอมแรก<sup>[1]</sup> รูปที่ 3.3 แสดงผลการจำลองบีมอาร์กอน 2 ลำ ส่วนรูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งที่บีมทั้ง 2 ลำมารวมกัน จะเห็นได้ว่าตำแหน่งรวมบีมแปรค่าตามพลังงานของบีม ดังนั้นจึงอาจลดค่าสนามแม่เหล็กซึ่งในที่นี้ใช้ค่าสนามสูงถึง 10 kG ลงได้อีก เพื่อให้ระยะรวมบีมมีค่ามาก ยังผลให้มุมที่บีมสอบเข้ารวมกันเป็นมุมเล็กๆ ไม่ใช่เป็นการตัดกันของบีม ผลการทดสอบระบบดึงบีมและเบนบีม ในเบื้องต้นใช้ระบบที่ออกแบบไว้ในคราวก่อนดังรูปที่ 3.5 เป็นภาพถ่ายระบบดึงและเบนบีมด้วยแม่เหล็กไดโพล 4 คู่ที่ประกอบแล้วเสร็จ ระยะห่าง (gap) ระหว่างแม่เหล็กมีขนาด 1.5 มม. ผลการทดลองดึงบีมอาร์กอนเป็นดังรูปที่ 3.6 คือจุดสว่างทั้ง 4 เป็นบีมอาร์กอนที่ถูกดึงจากหัวจ่ายไอออนด้วยพลังงาน 1 keV เคลื่อนที่ผ่านสนามไดโพลที่มีความยาว (path length) 4 ซม. ทำให้บีมอาร์กอนมีการกระจายออก (diverge) บางส่วนเกิดการเบนชนกับโครงสร้างที่ใช้ยึดแม่เหล็กไดโพล โดยจะเห็นแถบของแสง

สว่างทางซ้ายมืออย่างชัดเจน จำเป็นต้องลดความยาวแม่เหล็กไดโพลลง จึงได้ปรับเปลี่ยนการวางแม่เหล็กเสียใหม่เป็นดังรูปที่ 3.7 โดยเหลือแม่เหล็กไดโพลด้วย path length เพียง 1 ซม. และให้ทำการเบนบีมเพียงคู่เดียวเนื่องจากพื้นที่จำกัด ผลการทดลองได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.8 บีมอาร์กอนถูกดึงและเบนด้วยแม่เหล็กไดโพล มารวมกันที่จุดรวมบีม อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นได้ว่าบีมทั้งสองลำกระจายออก เป็นไปได้ว่าบีม กระจายเพราะการชนของบีมไอออนกับอนุภาคของก๊าซที่คงค้างภายในแชมเบอร์สุญญากาศ พิจารณา  $n$  เป็นจำนวนอนุภาคคงค้าง ( $m^{-3}$ ) คำนวณจากความสัมพันธ์

$$n = 3.2 \times 10^{22} P \text{ (torr)} \quad (m^{-3}) \quad (1)$$

กรณีที่ความดันก๊าซใกล้ทางออกบีมมีค่าเท่ากับความดันก๊าซอาร์กอนในหัวจ่าย คือ  $10^{-2}$  torr (กรณีเลวร้ายที่สุด) จะได้  $n$  มีค่า  $3.2 \times 10^{20} m^{-3}$  หรือ  $3.2 \times 10^{11} mm^{-3}$  หากลำบีมอาร์กอนขนาด 1 มม. มีกระแส 1mA (ค่ากระแสสูงสุด) ซึ่งเทียบเท่ากับไอออนอาร์กอนจำนวน  $1 mA / 1.6 \times 10^{-19} = 6.2 \times 10^{15}$  ตัวต่อวินาที วิ่งผ่านกลุ่มก๊าซดังกล่าว โอกาสที่ไอออนจะชนกับอนุภาคของก๊าซที่คงค้างคือประมาณ  $1/10000$  และโอกาสจะลดน้อยไปอีก  $10^3$  เท่าหากความดันก๊าซเป็น  $10^{-5}$  torr (วัดภายในแชมเบอร์) ดังนั้นประเด็นที่ว่า บีมกระจายออกอันเนื่องมาจากการชนกับอนุภาคของก๊าซที่คงค้างภายในแชมเบอร์จึงน่าจะละเลยได้ แต่หากพิจารณาผลจากการผลัดกันของประจุภายในบีมไอออน (space charge) เอง อาจพิจารณาด้วยสมการทางเดินของบีม (trajectory equation) ที่มีรัศมี  $r_b$  ต่อไปนี้<sup>[3]</sup>

$$\frac{d^2 r_b}{dz^2} = \frac{K}{r_b} + \frac{\epsilon_n^2}{\beta^2 r_b^3}, \quad (2)$$

เมื่อ  $K$  เป็น generalized beam perveance  $\equiv I_b / 4\pi V_b^{3/2} \sqrt{2e/m} = 6.5 \times 10^5 I_b \sqrt{m} / V_b^{3/2}$ ,  $V_b$  คือ ศักย์เร่ง  $I_b$  คือ กระแสบีม,  $\epsilon_n$  เป็น normalized beam emittance  $= 2 r_b \sqrt{kT_i / mc^2}$ ,  $\beta$  คืออัตราส่วนความเร็วไอออนต่อความเร็วแสง. หากเทียบอัตราส่วนเทอมหลังซึ่งยังผลให้บีมกระจายเนื่องจากอุณหภูมิไอออน ( $T$ ) กับเทอมแรก ซึ่งยังผลให้บีม กระจายเนื่องจากแรงผลักระหว่างประจุในบีมไอออน

$$\alpha = \frac{\epsilon_n^2 / \beta^2 r_b^2}{K} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้บีมอาร์กอนมีขนาด 100 ไมครอน มีพลังงาน 1 และ 10 keV ที่กระแสบีมต่างๆ กัน ผลลัพธ์สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้



$V_b(kV)$	$I_b(\mu A)$	$\alpha$
1	10	1/6.7
	100	1/67
	1000	1/667
10	10	1/2
	100	1/21
	1000	1/211

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าบีมีกระจายออก อันเนื่องมาจากสาเหตุของแรงผลักระหว่างประจุ โดยเฉพาะเมื่อกระแสบีมีสูงถึง 1 mA แต่จะลดการกระจายออกลงได้เมื่อเพิ่มศักย์เร่ง หรือเพิ่มพลังงานให้กับบีมีไอออน

เพื่อชดเชยการกระจายออกของบีมีไอออนจากการผลักกันของประจุภายใน เราอาจใช้เลนส์ไฟฟ้าติดตั้งไว้หลังแม่เหล็กไดโพล ทำหน้าที่ควบคุมขนาดของบีมี (โฟกัส) ที่จะไปรวมกัน ณ ตำแหน่งรวมบีมีอันเนื่องมาจากสนามไดโพล เราจำลองโดยกำหนดให้รูเปิดของบีมีแต่ละรูมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. และอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมใหญ่ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. โดยการใช้แม่เหล็กแบบ dipole ขนาดความเข้มสนาม 0.2 เทสลา และยาว 1 ซม. จะทำให้บีมีไอออนจากรูเปิดแต่ละรูถูกบังคับให้ลูเข้าหากันตรงแกนมุขของวงกลมใหญ่ที่ระยะ 30 ซม. และเพื่อจะให้ได้บีมีไอออนที่มีขนาดเล็ก จึงได้อาศัย Einzel lens ช่วยในการโฟกัสบีมีไอออน

การโฟกัสบีมีไอออนด้วย Einzel lens ขณะที่บีมีไอออนกำลังลูเข้าหากันนั้น จำเป็นจะต้องรักษา cylindrical symmetry ของ Einzel lens ด้วย กล่าวคือ ระนาบของแผ่นอิเล็กโตรดของเลนส์จะต้องตั้งฉากกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของ ideal particle (reference trajectory หรือ เส้นแกนมุขสำคัญ) ดังนั้น การคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคใดๆ จึงต้องอาศัย curvilinear coordinates (xys) โดย s คือ ระยะที่วัดตามเส้นแกนมุขสำคัญ ส่วน x และ y คือ ปริมาตรขจัดตามแนวขนานและแนวตั้งของ actual trajectory ที่วัดเทียบกับ reference trajectory โดยอาศัย cylindrical symmetry ของ Einzel lens ทำให้สามารถแทนตัวแปร x และ y ด้วย r เมื่อ r คือ ระยะตั้งฉากจากแกนมุขสำคัญ และเมื่อใช้ z แทนตัวแปร s พิกัด curvilinear จึงกลายเป็น (r, z)

ในบริเวณที่ติดตั้ง Einzel lens นั้น reference trajectory จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ทำให้ curvilinear coordinates ที่ใช้กลายเป็น initial frame of reference ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวรัศมี คือ

$$mr'' = qE_r \quad (4)$$

เมื่อ  $r''$  คือ ความเร่ง  $m$  และ  $q$  คือ มวลและประจุไฟฟ้าของอนุภาคตามลำดับ ส่วน  $E_r$  คือ ค่าสนามไฟฟ้าตามแนวรัศมีของ Einzel lens

เมื่อเปลี่ยนตัวแปรอิสระจากเวลา  $t$  เป็นระยะทาง  $z$  สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะกลายเป็น<sup>(1)</sup>

$$r'' = \left\{ qE_r (1+r'^2)^2 - qE_z (1+r'^2)r' \right\} / 2(E_0 - qV) \quad (5)$$

เมื่อ  $r' = \frac{dr}{dz}$  และ  $r'' = \frac{d^2r}{dz^2}$  ส่วน  $E_0$ ,  $V$  และ  $E_z$  คือค่าพลังงาน ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้าตามแกน  $z$  ตามลำดับ สำหรับค่า  $V$ ,  $E_r$  และ  $E_z$  ที่เกิดจาก Einzel lens ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON

การถอดสมการเพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น ได้อาศัย numerical integration ด้วยวิธีของ Runge-Kutta-Fehlberg ส่วนค่าตั้งต้นของการเคลื่อนที่ได้กำหนดให้ค่า slope  $r' = 0$  และค่า  $r$  ตั้งต้น 10 ค่าโดยอยู่ระหว่าง 0-0.5 มม. ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Einzel lens คือขนาดของรูและระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ด้วยวิธีการ trial and error พบว่าค่าที่ทำให้เกิดการโฟกัสที่ดีที่สุด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเท่ากับ 5 มม. และระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด คือ 4 มม. ในการเลือกให้บีมไอออนไปโฟกัสที่แกนมุขสำคัญนั้น พบว่าต้องใช้ศักย์ไฟฟ้า 5 โวลท์ที่อิเล็กโทรดแผ่นกลาง และจะได้ beam waist ขนาด 0.054 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.9

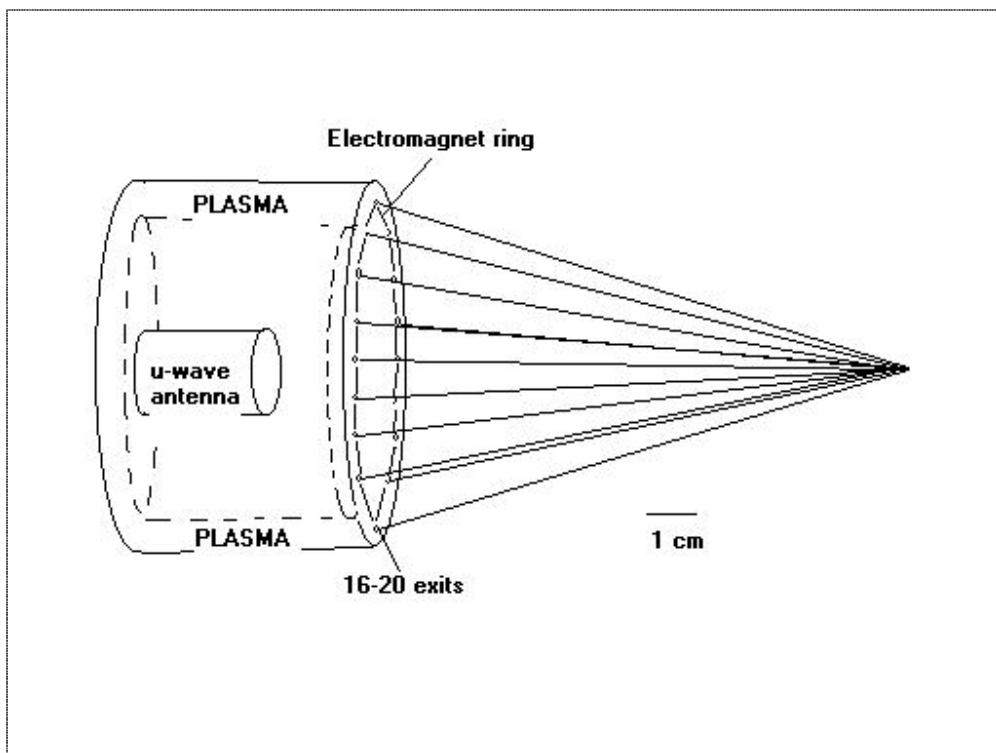
### 3.2 ระบบดิ่งบีมขนาดไมครอน

ได้จำลองและออกแบบระบบดิ่งบีมขนาด 100 ไมครอน มี 16 รูเปิด ผลการจำลองดังรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่าบีมอาร์กอนสามารถดิ่งผ่านรูเปิดขนาด 100 ไมครอน ด้วยอิเล็กโทรดตั้ง 2 ชั้นบีมที่ได้จะมีค่า emittance ต่ำเพียง 1.1 mm mrad ถึงแม้ว่ากระแสบีมจะแปรค่าไปก็ตาม สำหรับแบบของขึ้นอิเล็กโทรดแสดงในรูปที่ 3.11 รูเปิดทั้ง 16 อยู่บนเส้นรอบวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. โดยขณะนี้อยู่ระหว่างดำเนินการประกอบขึ้นอิเล็กโทรดเพื่อใช้ทดลองดิ่งบีมอาร์กอนขนาด 100 ไมครอนในระยะต่อไป ซึ่งคาดว่าจะได้ทดสอบระบบรวมอันประกอบด้วย

- 3.1 บีมอาร์กอนขนาด 100 ไมครอน 16 รูเปิด จากหัวจ่ายไอออน
- 3.2 ระบบเบนบีมเพื่อโฟกัสบีมหลายลำแบบไดโพล (แม่เหล็กไฟฟ้า)
- 3.3 ระบบเลนส์ Einzel เพื่อคุมขนาดบีมแต่ละลำ

#### 4. หัวจ่ายไอออนแบบ cigar type dc source

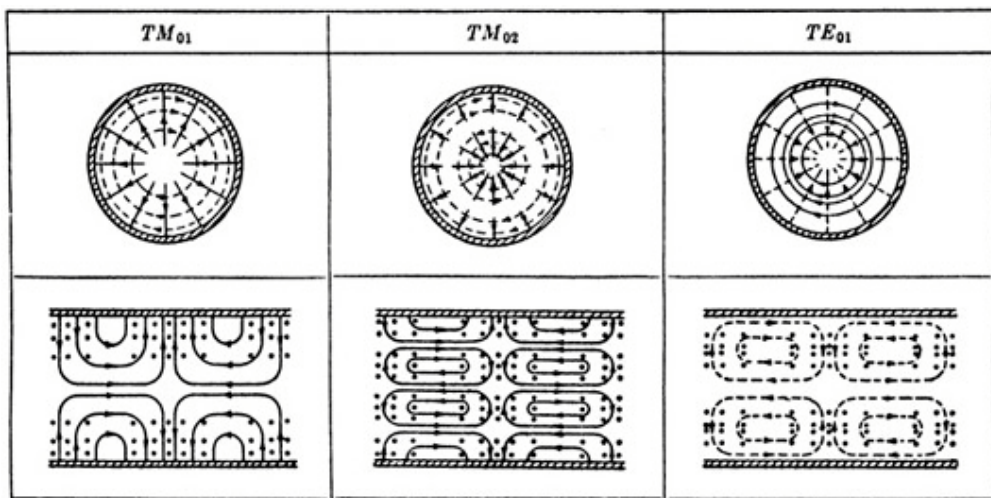
จากความต้องการหัวจ่ายไอออนอาร์กอนที่มีความเข้มของพลาสมาสูงในระดับ  $10^{15}$  ไอออน/ซม<sup>2</sup> หัวจ่ายจึงต้องทำงานที่ความดันก๊าซอาร์กอนระดับ 0.1 Torr และใช้คลื่นไมโครเวฟกระตุ้นให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมา ทั้งนี้เพราะคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการกระตุ้นก๊าซความดันสูงให้แตกตัวได้ดีกว่าการใช้คลื่นวิทยุความถี่ต่ำ (HF) ซึ่งจะทำให้ได้พลาสมาที่มีความเข้มสูงพอที่จะผลิตบีมอาร์กอนขนาด 1 mA จากหัวจ่ายผ่านรูเปิดขนาด 10-30 ไมครอน การดึงไอออนอาร์กอนจากหัวจ่ายไอออนที่มีความเข้มของพลาสมาสูงๆ จะอาศัยความต่างของระดับความดันในหัวจ่ายและห้องสุญญากาศขนาดกว่า 1000 เท่า และบีมของอาร์กอนที่ผ่านรูเปิดขนาดเล็ก เป็นระยะทางที่ยาว (1:50) จะถูกรีดให้เป็นลำออกมาและไปในทิศทางเดียวกัน การกระเจิงอันเนื่องจากการชนกันของไอออนในบีมมีค่าต่ำส่งผลให้ค่าการกระจายออกของบีม (diverge) น้อยลงไป<sup>(4)</sup>



หัวจ่ายจะปล่อยบีมอาร์กอนจากรูเปิดขนาด 10-30 ไมครอน จำนวน 16-20 รูเปิด ผ่านระบบรวมบีมที่มีลักษณะเป็นวงแหวนแม่เหล็กไฟฟ้าไดโพลที่มี gap เล็กๆ ทำการเบนบีมทั้ง 16-20 ลำเข้ารวมกัน ณ จุดรวมบีมเป็นแบบแกนสมมาตร (ดังรูป) ทำให้เกิดบีมรวม (combined beam) ที่มีความเข้มของบีมอาร์กอนเพิ่มขึ้นเข้าสู่ระบบกวาดบีมที่จะนำไปสู่การเซาะร่องแวนซิลิกอนต่อไป

#### 4.1 การคำนวณและออกแบบหัวจ่ายไอออน

จากแนวทางหัวจ่ายไอออนอาร์กอนที่เสนอไว้ จำเป็นต้องคำนวณตำแหน่งและทิศทางสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz หรือเพื่อเลือกโหมดของคลื่นไมโครเวฟที่จะกระตุ้นก๊าซอาร์กอนให้แตกตัวเป็นพลาสมา โดยถือว่าหัวจ่ายไอออนเป็นเรโซแนนซ์คาวิตี้ (resonance cavity) รูปทรงกระบอกที่ความถี่นี้ โหมดที่ให้สนามไฟฟ้าในแนวแกนทรงกระบอกซึ่งจะวางแท่งแก้วบรรจุก๊าซอาร์กอนจำนวน 16-20 แท่ง คือโหมด TM เพื่อกำหนดขนาดของหัวจ่ายไอออน สามารถพิจารณาจากสมการหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ภายในคาวิตี้แบบทรงกระบอก <sup>(5)</sup>



$$f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{P_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

- เมื่อ  $P_{nm}$  เป็นค่ารากเบสเซลของโหมด TM  
 $a$  เป็นรัศมีของคาวิตี้ (cm)  
 $d$  เป็นความยาวคาวิตี้ (cm)  
 $l$  เป็นเลขจำนวนเต็มของครึ่งความยาวคลื่นตามความยาว  $d$

กรณีนี้เลือกใช้โหมด  $TM_{02}$  ค่า  $P_{nm}$  มีค่า 5.52 ที่ความถี่ 2.45 GHz รัศมีของหัวจ่ายจะเท่ากับ 10 ซม. สำหรับค่าความยาวของหัวจ่าย  $d$  จะให้ปรับค่าได้ระหว่าง 4-10 ซม. ทั้งนี้เพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์พอดี สำหรับการป้อนกำลังไมโครเวฟคาดว่าจะใช้เป็นแบบผ่านสายโคแอกเซียลเข้าไปที่หัวจ่าย โดยคลิปลิ้นผ่าน antenna แบบ slot โดยอยู่ระหว่างการออกแบบให้เหมาะสม

ลักษณะของหัวจ่ายได้ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 คณะผู้วิจัยโดยคำแนะนำของที่ปรึกษาเห็นว่าจำเป็นต้องแยกเป็นหัวจ่ายย่อยๆ 16-20 หัว แทนที่จะเป็น cylindrical

concentric chamber ซึ่งจะใช้กำลังของคลื่นไมโครเวฟสร้างพลาสมามากเกินไปและเป็นการสูญเสียเปล่า ในรูปจะเห็นว่าหัวจ่ายประกอบด้วยแท่งแก้วควอทซ์หรือ Pyrex จำนวน 20 แท่ง เป็นห้องพลาสมาหรือหัวจ่ายย่อยอิสระจากกัน ประกอบได้ด้วย microwave flange ทำหน้าที่เป็นทางเข้าของคลื่นไมโครเวฟ จ่ายก๊าซอาร์กอน และเป็นขั้วอาโนดของหัวจ่าย และ front flange ทำหน้าที่เป็นทางออกของบีมอาร์กอนมีความหนา 500 ไมครอนและเป็นขั้วคาโทดของหัวจ่าย รูปที่ 4.4 เป็นแบบของหัวจ่ายไอออนเพื่อผลิตบีมรวมอาร์กอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม.

#### 4.2 หัวจ่ายไอออน

หลักการการทำงานของหัวจ่ายย่อย cigar type แสดงในรูปที่ 4.5 ในเบื้องต้นก๊าซอาร์กอนภายในหลอดแก้วที่ความดันประมาณ 0.1 Torr ถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นพลาสมาด้วยสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ การดิสชาร์จด้วยไมโครเวฟอาศัยหลักการว่า อิเล็กตรอนรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟ โดยที่กำลังงานดูดกลืนเฉลี่ยในพลาสมา คำนวณได้จาก

$$P_{abs} = \frac{n_e e^2}{2m_e \nu_e} \left[ \frac{\nu_e^2}{(\nu_e^2 + \omega^2)} \right] |E_e|^2$$

จากนั้นหัวจ่ายจะถูกไปอัดด้วยแรงดันระหว่าง 60-100 โวลท์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอาโนดและคาโทด ทำให้อิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมาแยกจากกันไปสร้างชีท (sheath) ที่แต่ละขั้ว ไอออนบางส่วนที่ชนกับขั้วคาโทดทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งนำไปสู่การแตกตัวชนิดฟังทลาย<sup>(6)</sup> ทำให้พลาสมาที่ได้มีความเข้มสูงมากขึ้น ไอออนที่ทะลุผ่านชีทคาโทดได้จะถูกรีดผ่านรูเปิดขนาดเล็กเป็นระยะทางยาว ออกมาเป็นบีมไอออน

จากแนวทางหัวจ่ายไอออนอาร์กอนที่เสนอไว้ในแบบคร่าวก่อน โดยถือว่าหัวจ่ายไอออนเป็นเรโซแนนซ์ควิตี้รูปทรงกระบอก ของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz (resonance cavity) ตำแหน่งวางแท่งแก้วบรรจุก๊าซอาร์กอนจำนวน 20 แท่ง ที่ระยะรัศมี 6.5 ซม. เป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้าในโหมด TM มีค่าสูงสุด

ลักษณะของหัวจ่ายดำเนินการสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ในรูปจะเห็นว่าหัวจ่ายไอออนประกอบด้วยหัวจ่ายย่อยจำนวน 20 อัน อิสระจากกัน ประกอบได้ด้วย microwave flange ทำหน้าที่เป็นทางเข้าของคลื่นไมโครเวฟ จ่ายก๊าซอาร์กอน และเป็นขั้วอาโนดของหัวจ่าย และ front flange ทำหน้าที่เป็นทางออกของบีมอาร์กอน โดยแต่ละรูเปิดบีมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 ไมครอน มีความหนา 2 มม. และเป็นขั้วคาโทดของหัวจ่าย

รูปที่ 4.8 เป็นหัวจ่ายไอออนที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว เหลือส่วนที่ต้องปรับแต่งคือ ทางเข้าของสายโคแอกเซียลติดตั้ง antenna และ การแมทซึ่งกำลังไมโครเวฟ

## 5. ระบบไมโครเวฟ

สำหรับการป้อนกำลังไมโครเวฟให้แก่หัวจ่ายไอออนเป็นแบบผ่านสายโคแอกเซียลเข้าไปที่หัวจ่ายโดย คัปปลิ่งผ่าน antenna ทั้งนี้จากแหล่งกำเนิดไมโครเวฟดังรูปที่ 4.9 จะมี coupler ทำการแปลงคลื่นไมโครเวฟจากท่อนำคลื่นไปสู่สายโคแอกเซียล RG-213 ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการติดตั้งระบบให้แยกจากกัน จากนั้นไมโครเวฟจะกระจายเข้าสู่หัวจ่ายไอออนด้วย antenna

อย่างไรก็ตามต้องมีการปรับแมทซึ่งให้แก่ไมโครเวฟ เพื่อการส่งถ่ายกำลังสูงสุดและป้องกันแหล่งกำเนิดไมโครเวฟเสียหาย จะต้องมีระบบปรับแมทซึ่งทั้งทางด้านแหล่งกำเนิดและด้านหัวจ่าย จึงได้ทดลองสร้างโมดูลหัวจ่ายขึ้นเพื่อทดลองใช้เป็นโหนดแทนหัวจ่ายไอออนจริง ลักษณะโมดูลทดสอบแมทซึ่งแสดงในรูปที่ 4.10 ทำจากทองแดงขนาดเท่ากับหัวจ่ายจริง โดยมี antenna ความยาวประมาณ 3 ซม.เท่ากับ  $\frac{1}{4}$  ของความยาวคลื่นไมโครเวฟ ทำหน้าที่จ่ายกำลังไมโครเวฟไว้ในห้องโมดูลสำหรับรูปที่ 4.11 แสดง coupler ทางด้านแหล่งกำเนิดไมโครเวฟที่มี plunger ไว้ปรับแมทซึ่ง

## เอกสารอ้างอิง

1. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง และคณะ 'รายงานวิจัย การพัฒนาลำไอออนเพื่อตัดร่องแคบในสารกึ่งตัวนำ เซลแสงแดด' 2544
2. Wiedermann, H. 'Private communications' 2001
3. อีจวรรณ บุญญวรรณ “ระบบบีเอ็มโพกัสความเข้มสูงของอาร์กอนไอออน” วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2545
4. W. Tantraporn, “A New Design Concept for High Current High Brightness and Scanable Beam,” March 1998, and private communication
5. D. M. Pozar, “Microwave Engineering” 1986 Addison Wesley
6. S. Kitsumpan 2003 Private communication.

ตารางที่ 2.1  
ค่าพารามิเตอร์ของอินพุทโปรแกรม KOBRA3-INP

1.k 0.001a 0.1q Ar=40 u

101	101	101							mesh point X,Y,Z
1	1	60	0.0005001						
1	61	100	0.0015001						
2	1	100	0.0004001						
3	1	100	0.0004001						
0	0	0	0.0						
1									origin for 4 hole
0.0	0.020	0.01							
2									
0.0	0.020	0.03							
3									
0.0	0.0	0.0							
4									
0.0	0.01	0.020							
5									
0.0	0.03	0.020							
0									
4									number of potential
1	1040.0								
2	1000.0								
3	-100.0								
4	0.0								
1	2	2							plasma electrode on 1kV
4	0.0	360.0	4						
0.0020	0.00045		1.01	3					
0.0040	0.00045		1.01	3					
0.0050	0.00350		1.01	4					
0.0060	0.00350		1.01	4					
1	2	4	5						
1	2	3							screening electrode on -0.1kV
2	0.0	360.0	3						
0.010	0.00045		1.0	3					
0.012	0.00045		1.0	4					
1	2	3							



```

1  2  4
4  0.0 360.0 4
0.011 0.00300 1.0 3
0.012 0.00075 1.0 3
0.014 0.00075 1.0 4
0.015 0.00100 1.0 4
1  2  4  5
3  1  3
0.020 0.030 0.0 0.014 0.0 0.014
3  1  3
0.020 0.030 0.026 0.040 0.0 0.014
3  1  3
0.020 0.030 0.0 0.014 0.026 0.040
3  1  3
0.020 0.030 0.026 0.040 0.026 0.040
3  1  3
0.020 0.030 0.014 0.026 0.014 0.026
0  0  0
1  3  101 101 101 101
300 0.0001 0 0.0001 4 1

```

ground electrode on 0 V

P

plasma parameters

```

1040 5.0 1
8000
7
2000 0.1 0 1 40 1 .001
0.02 0.01 0.0025 0.00001 0.00001 50
7
2000 0.1 0 1 40 1 .001
0.02 0.03 0.0025 0.00001 0.00001 50
7
2000 0.1 0 1 40 1 .001
0.01 0.02 0.0025 0.00001 0.00001 50
7
2000 0.1 0 1 40 1 .001
0.03 0.02 0.0025 0.00001 0.00001 50
0

```

M

magnetic fields

2

## ตารางที่ 2.2

### โปรแกรมภาษาฟอร์แทรนเพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กไดโพล

```
dimension x(121,101,101),y(121,101,101)
do 1 i=41,90
do 1 j=46,55
do 1 k=66,80
  x(i,j,k)=-5.0
1 continue
do 2 i=41,90
do 2 j=46,55
do 2 k=21,35
  x(i,j,k)=5.0
2 continue
open (1,file='by.bin',form='binary',access='sequential')
do i=1,121
  write(1)((x(i,j,k),j=1,101),k=1,101)
end do
do 14 i=41,90
do 14 j=66,80
do 14 k=46,55
  y(i,j,k)=5.0
14 continue
do 17 i=41,90
do 17 j=21+i-76,35
do 17 k=46,55
  y(i,j,k)=-5.0
17 continue
open (2,file='bz.bin',form='binary',access='sequential')
do i=1,121
  write(2)((y(i,j,k),j=1,101),k=1,101)
end do
end
```

## ภาคผนวก

## กิจกรรมและผลงานในช่วงปี 2544-2546

กิจกรรมในช่วง : 1 มิถุนายน - 30 พฤศจิกายน 2544

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. ดัดแปลงหัวจ่ายไอออนแบบ rf multicusp เพื่อ isolate ชี้นิวเคลียร์ไอออนจากหัวจ่าย	เป็นการแยกแรงแรงดันของพลาสมา ออกจากชี้นิวเคลียร์ไอออน เพื่อดูพฤติกรรมการพุ่งออก(flow) ของพลาสมา ลดการใช้แรงแรงดัน	การเตรียมวัสดุ(ไม้ก้ำ) แล้วเสร็จ พร้อมติดตั้ง เพื่อทดสอบการแยกแรงแรงดันเร็ว ๆ นี้	ปรับกิจกรรมนี้ไปช่วงหลังเพื่อให้ต่อเนื่องกับการติดตั้งระบบดึงใหม่
2. จำลองการโฟกัสบีมไอออนหลายลำโดยใช้เลนส์แม่เหล็กถาวร	ศึกษาพฤติกรรมของบีมอาร์กอนพลังงาน 1 keV ในสนามแม่เหล็กไดโพล เพื่อออกแบบระบบรวมบีม	ผลการจำลองที่ได้ นำพหุใจ ไปสู่การออกแบบระบบดึงและเบนบีม 4 ลำ	จำเป็นต้องปรับรูปทรงของแม่เหล็กเพื่อให้ได้บีมแบบโฟกัส
3. ออกแบบระบบดึงบีมแบบหลายรูและระบบแม่เหล็กเบนบีม	แบบของระบบดึงบีมแบบหลายลำ พร้อมระบบเบนบีมแม่เหล็กไดโพล เพื่อการรวมบีม	ได้แบบและสร้างระบบดึงและเบนบีม 4 ลำแล้ว เสร็จ พร้อมทดสอบร่วมกับ isolate ชี้นิวเคลียร์ไอออนจากหัวจ่าย	การดำเนินงานก้าวหน้ากว่าที่วางแผนเล็กน้อย

กิจกรรมในช่วง : 1 ธันวาคม 2544- 20 พฤษภาคม 2545

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. ออกแบบระบบดึงบีมแบบหลายรูและระบบแม่เหล็กเบนบีม	แบบของระบบดึงบีมแบบหลายลำ พร้อมระบบเบนบีมแม่เหล็กไดโพล เพื่อการรวมบีม	ออกแบบและสร้างระบบดึงและเบนบีม 4 ลำแล้ว เสร็จ พร้อมทดสอบ	-
2. ติดตั้งระบบดึงบีมและทดสอบวัดบีมอาร์กอนที่ 4/16 รู	ได้ระบบดึงบีมเพื่อทดสอบดึงบีมอาร์กอนหลายลำจาก 4/16 รูเปิด	ทดสอบระบบดึงบีมที่ 4 รู พลังงาน 1-9 keV ได้บีมอาร์กอน 4 ลำ	สามารถทดสอบดึงบีมที่ 4 รูเปิด ที่ 16 รูเปิด อยู่ระหว่างดำเนินการ
3. ติดตั้งระบบเลนส์แม่เหล็กกับบีมอาร์กอนหลายลำ	บีมอาร์กอนหลายลำมีการโฟกัส เนื่องจากสนามไดโพลที่จุดรวมบีม	ทดสอบระบบเบน(โฟกัส) บีมด้วยเลนส์ไดโพล 2 ชุด เห็นบีมรวมกันที่จุดรวมบีม	การดำเนินการทดสอบก้าวหน้ากว่าที่วางแผนเล็กน้อย

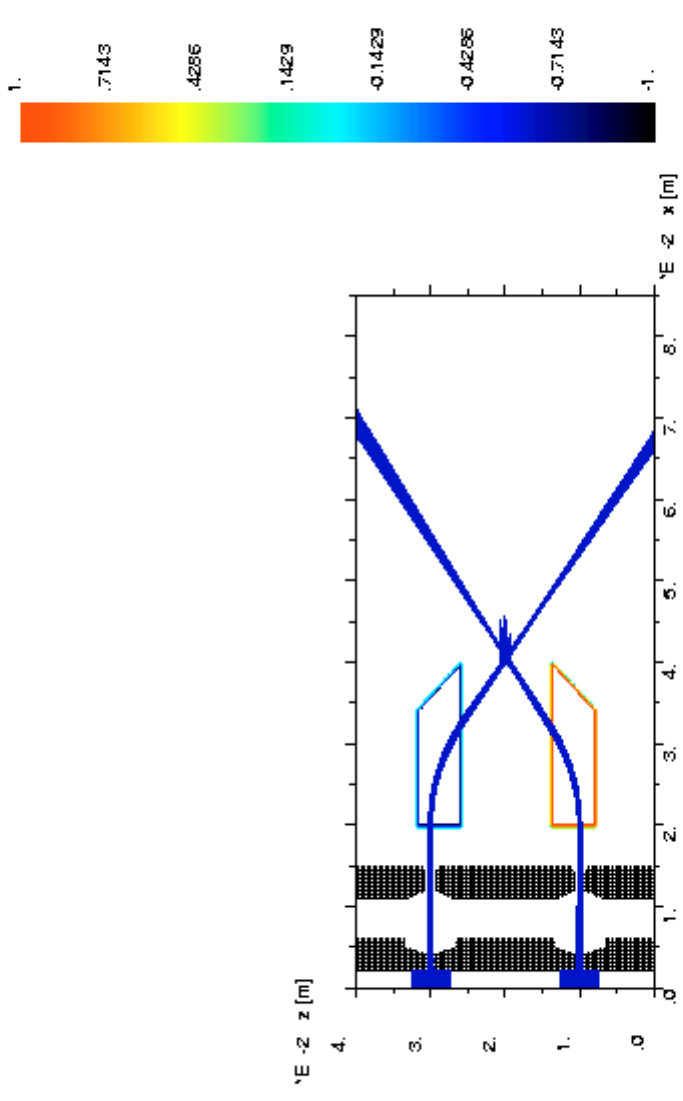
**กิจกรรมในช่วง : 1 สิงหาคม - 15 พฤศจิกายน 2545**

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. ออกแบบและสร้างหัวจ่ายไอออนเพื่อผลิตบีมอาร์กอนขนาดไมครอน ที่ 16-20 รูเปิด	หัวจ่ายไอออนที่สามารถผลิตบีมอาร์กอน โดยกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz	การออกแบบรูปทรงและขนาดหัวจ่ายที่สอดคล้องกับการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟสำเร็จลุล่วง	ปรับปรุงตามคำแนะนำของที่ปรึกษาโครงการ ----- งานลุล่วง 55 %
2. ออกแบบและสร้างระบบวัดขนาดและกระแสของบีมรวมแบบ x-y scan	ระบบวัดขนาดและกระแสของบีมอาร์กอนแบบถ้วยฟาราเดย์ เคลื่อนที่ในสองแนวแกน	อยู่ระหว่างการออกแบบแท่น x-y	----- งานลุล่วง 25 %

**กิจกรรมในช่วง : 16 พฤศจิกายน 2545-15 พฤษภาคม 2546**

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. ติดตั้งระบบรวมบีมแบบวงแหวนแม่เหล็กไฟฟ้าโคโรลา	ระบบรวมบีมแบบวงแหวนแม่เหล็กไฟฟ้าโคโรลา เพื่อการรวมบีมจากหัวจ่ายไอออน	อยู่ระหว่างการออกแบบระบบ	เพิ่งได้เริ่มดำเนินการ ----- งานลุล่วง 25 %
2. ทดสอบระบบผลิตบีมรวมและตรวจวัดขนาดและกระแสของบีม ณ จุดรวมบีม	ผลการทดสอบระบบและขนาดและกระแสของบีม	ยังไม่ได้เริ่มการทดสอบ	ต้องรอข้อ 1 ----- งานลุล่วง 0 %

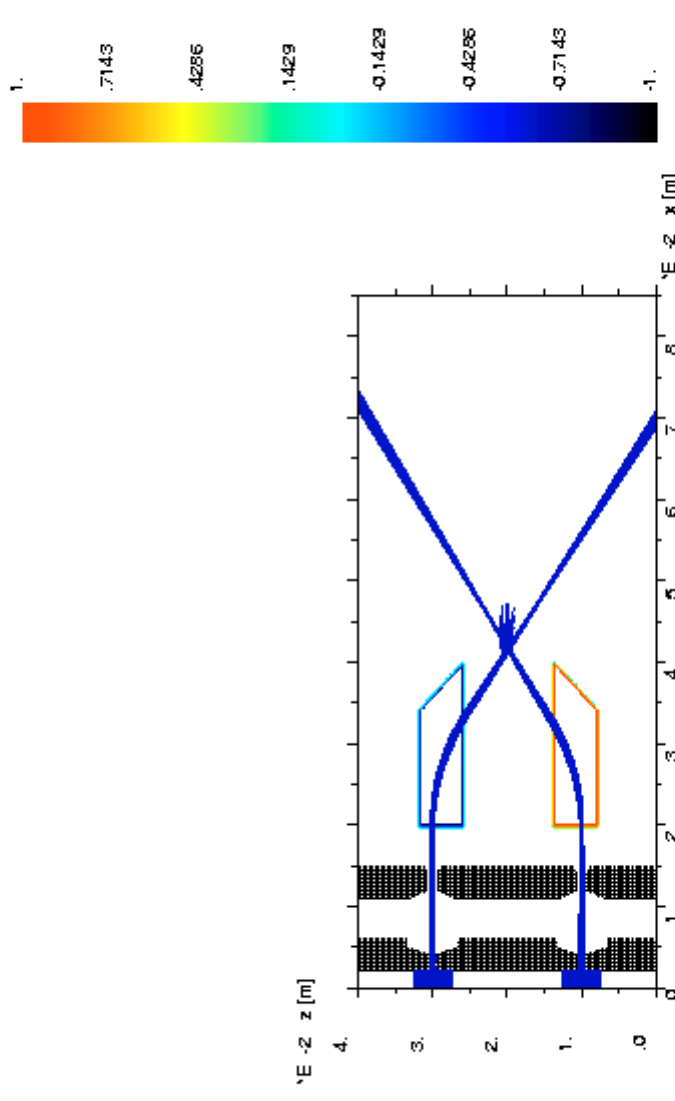
KOBRIAS-INP VERSION 3.39  
 y comp.      in xz plane      magnetic flux density      RUN      iteration      1      0      1  
 .02 meter



COMMENT: 5k.0.0018 0.1q A1-40 u  
 Chiang Mai University      TIME: 14.37  
 DATE: 09/03/01

รูปที่ 2.1 ผลการจำลองคิงและเบรมบีมอาร์กอนพลังงาน 0.5 keV (แสดงเพียง 2 จาก 4 ลำปี่และไม่ได้แสดงอิเล็กโทรดตัวสุดท้าย)

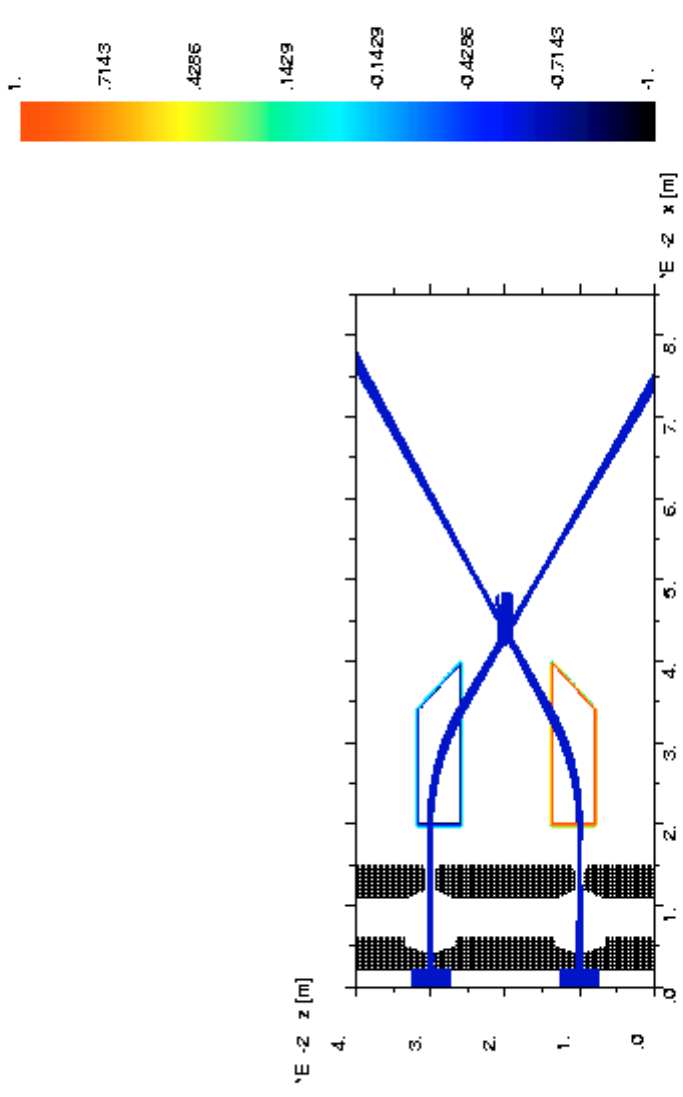
KOBRIAS-INP VERSION 3.39      magnetic flux density      RUN      iteration      1      0      1  
 y comp.      in xz plane at y=      .02 meter      PLOT004.PS      color table      [T]



COMMENT: .5k.0.001e.0.1q Ar-40 u      Chiang Mai University      TIME: 14:32  
 DATE: 03/03/01

รูปที่ 2.2 ผลการจำลองตั้งและเป็นอาร์กอนพลังงาน 0.6 keV (แสดงเพียง 2 จาก 4 ลำดับและไม่แสดงอิเล็กโทรดตัวสุดท้าย)

KOBRA3-INP VERSION 3.39  
 y comp.      in xz plane at y=      magnetic flux density      RUN      iteration      1      0      1  
 .02 meter      color table      PLOT008.PS      1      1

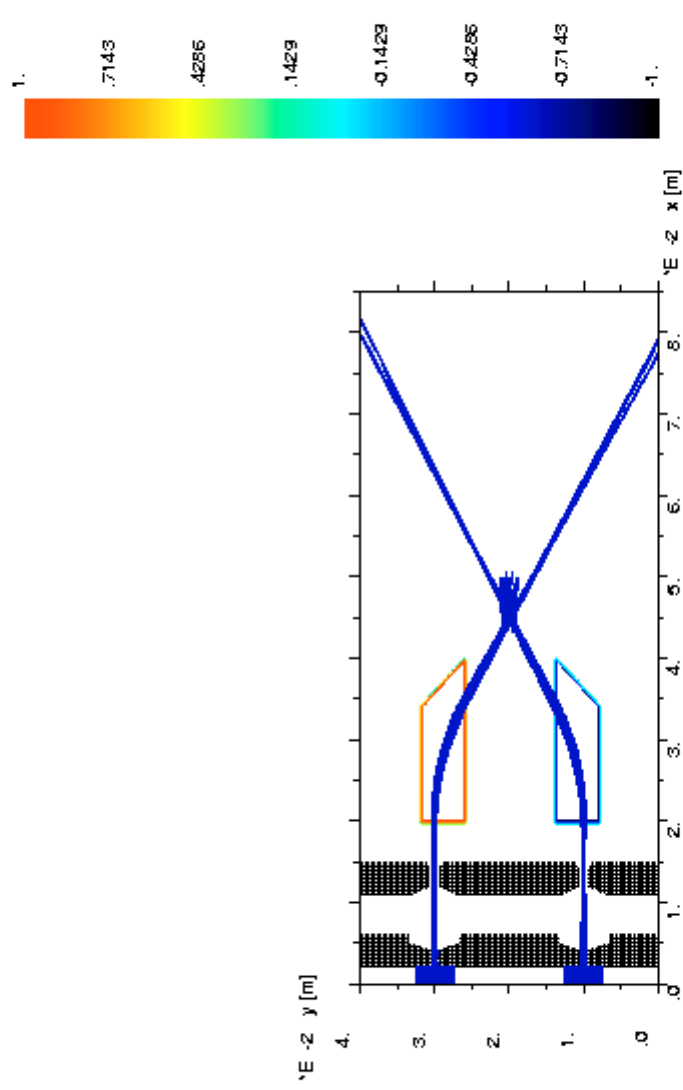


COMMENT: .8x.0001a 0.1q A1-40 u  
 Chiang Mai University      TIME: 15:30  
 DATE: 09/03/01

รูปที่ 2.3 ผลการจำลองคิงดิงและเบมบีมอาร์ทก่อนพลังงาน 0.8 keV (แสดงเพียง 2 จาก 4 ลำบีมและไม่แสดงอิเล็กโทรดตัวสุดท้าย)



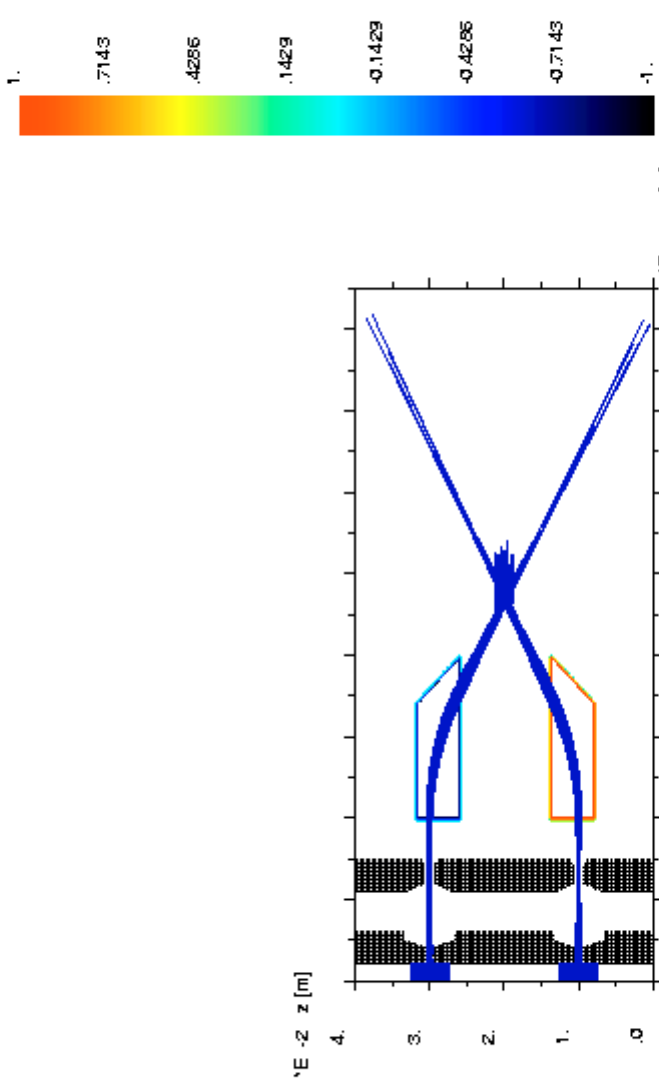
KOBRA3-IMP VERSION 3.39  
 z comp. in xy plane at z= iteration 1 RUN 1  
 magnetic flux density color table [T]



COMMENT: 1 k0.00180.1q At-40 u  
 Chiang Mai University  
 DATE: 07/19/01 TIME: 15:32

รูปที่ 2.4 ผลการจำลองคิ่งและเบรมที่มีอาร์กอนพลังงาน 1.0 keV (แสดงเพียง 2 จาก 4 ลำดับและไม่แสดงอิเล็กทรอนิกส์ที่ทรอดตัวสุดท้าย)

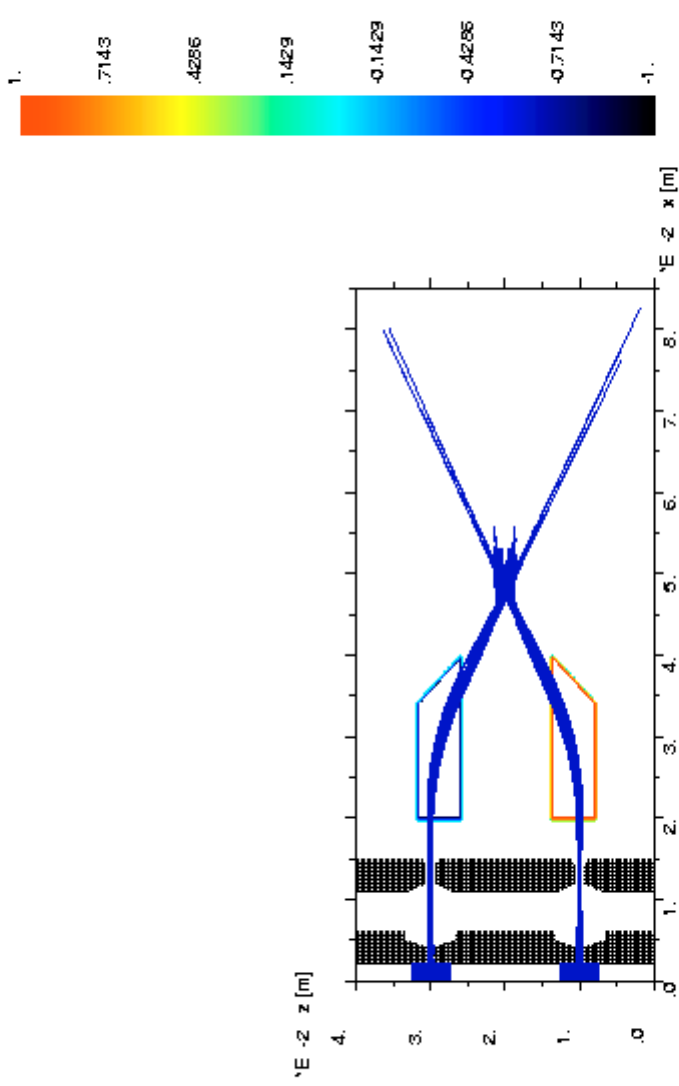
KOBRA3-INP VERSION 3.39  
 y.comp.                    in   xz plane   at y=-                    RUN                    iteration                    1                    1                    1                    1  
 magnetic flux density                    PLOT016.PS                    color table                    [ ]



COMMENT: 1.3k 0.001a 0.1q Ai-40 u  
 Chiang Mai University  
 DATE: 09/04/01                    TIME: 15:33

รูปที่ 2.5 ผลการจำลองตั้งและเบนมอเตอร์ก่อนพลังงาน 1.3 keV (แสดงเพียง 2 จาก 4 ลำดับและไม่แสดงอิเล็กทรอนิกส์โทรตัวสุดท้าย)

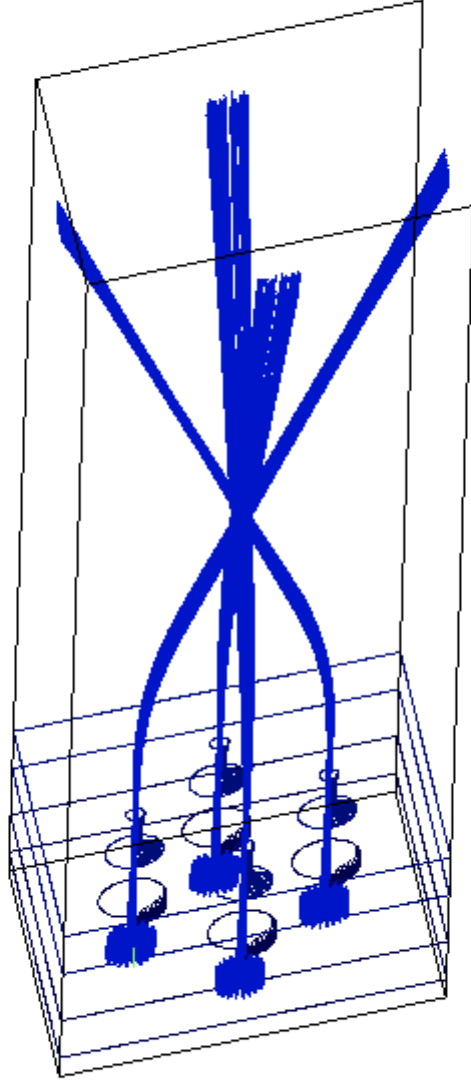
KOBRA3-INP VERSION 3.33g  
 y.comp. in xz plane at y= iteration 1 0 1  
 RUN .02 meter PLOT001.PS color table [ ]



COMMENT: 1.5k 0.001a 0.1q A1=40 u  
 Chiang Mai University  
 DATE: 09/05/01 TIME: 15:33

รูปที่ 2.6 ผลการจำลองคิงและเบรมนิมอาร์กอนพลังงาน 1.5 keV (แสดงเพียง 2 จาก 4 ลำบีมและไม่แสดงอิเล็กโทรดตัวสุดท้าย)

KOBRA3-INP VERSION 3.39      3D representation      RUN      iteration      1      0      2      1  
 angle :      30.      -75.      75.      PLOT007.PS



COMMENT: 1.k0.001e0.1q Ar-40 u

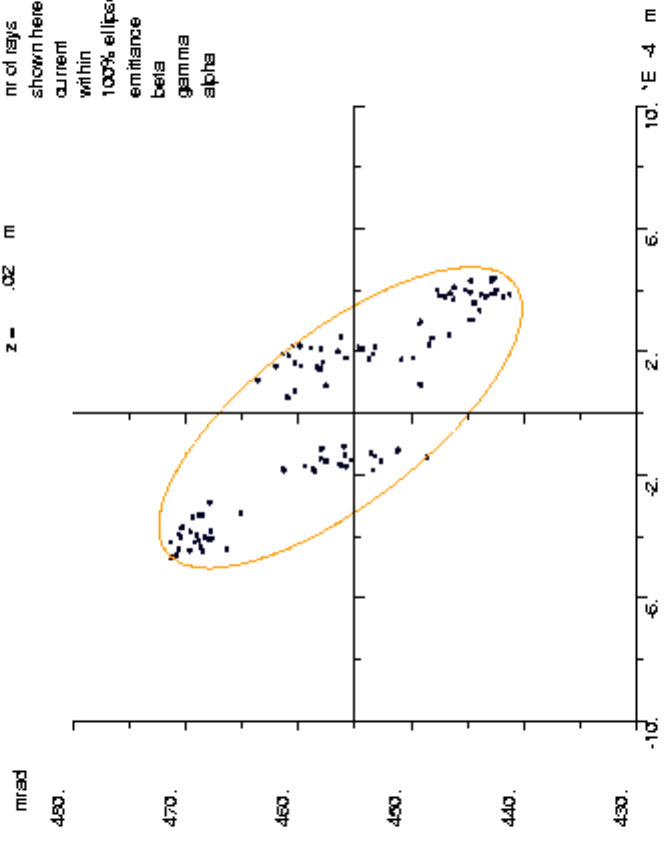
Chiang Mai University  
 DATE: 03/11/01      TIME: 13:31

รูปที่ 2.7 ผลการจำลองการตั้งและเบนมีมอริกอนพลังงาน 1.0 keV ใน 3 มิติ จะเห็นว่ามีตัดกัน ณ จุดรวมมีม อาจต้องลดค่าสนามเพื่อเพิ่มคอดีฟูรวมกัน

KOBRA3-INP VERSION 3.39

iteration	1	0	1
nr of rays	156		
shown here	156		
current	.16E-03	A	
within	.16E-03	A	
100% ellipse			
emittance	.54E-05	m	1
beta	.044	m	
gamma	47.6101	rac	
alpha	1.047		

RUN 1 0 1  
 x = .0452 m  
 y = .02 m  
 z = .02 m  
 PLOT013.PS  
 y-emittance plot  
 emittance at



COMMENT: 1.k0001e0.1q A1r-10 u  
 Chiang Mai University  
 DATE: 03/11/01 TIME: 14:12

รูปที่ 2.8 แสดงค่า emittance ของบีมที่ติดตั้งได้ ณ ตำแหน่งจรวบีม ( $x = 0.45$  cm) ซึ่งมีค่าเพียง 5.4 mm mrad และมีการเพิกัดในบางแกนเนื่องจากบีมลดขนาดลงครึ่งหนึ่ง

KOBRA3-INP VERSION 3.33g

real space plot  
emittance at

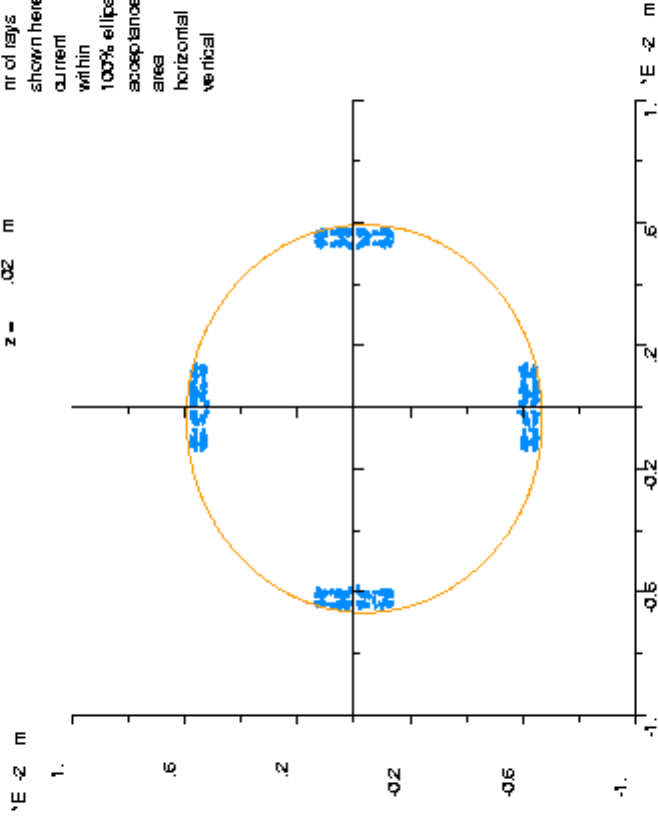
x = .0005 m  
y = .02 m  
z = .02 m

RUN

iteration  
PLOT0001.PS

1 0 1

nr of rays 624  
shown here 624  
current 62E-03 A  
within 62E-03 A  
100% ellipse  
acceptance .12E-03 m2  
area .0003 m  
horizontal .0003 m  
vertical

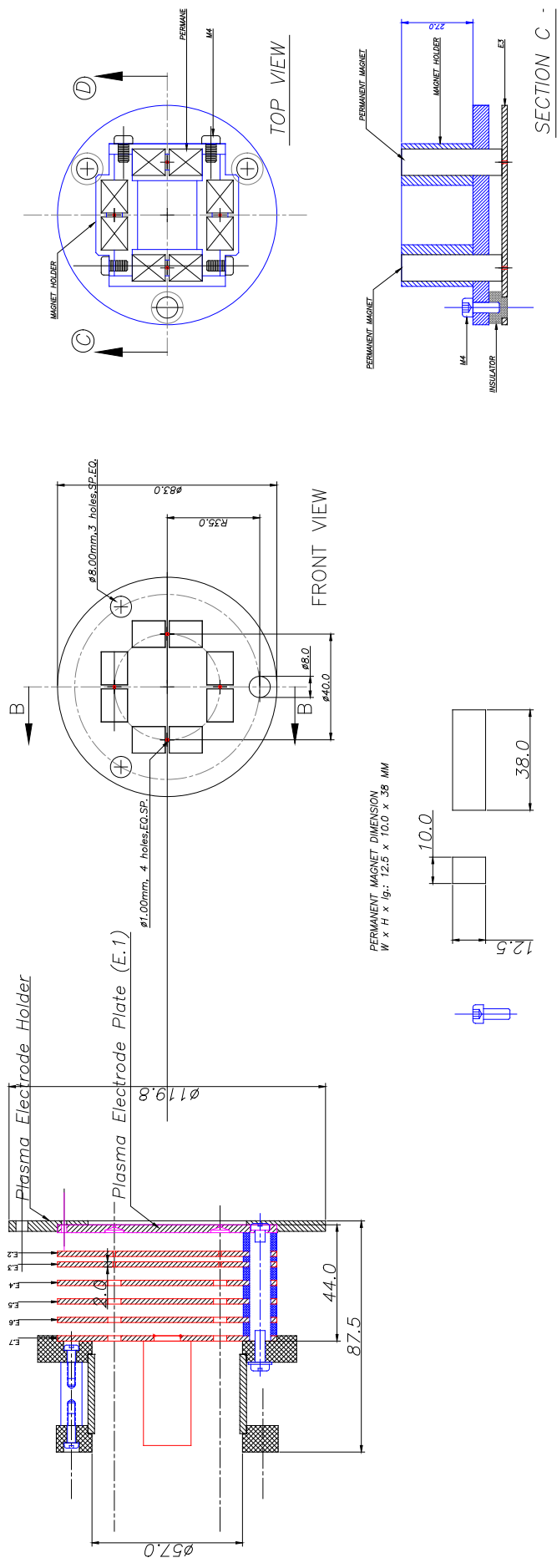


COMMENT: 1 k 0.001a 0.1q Ar=40 u

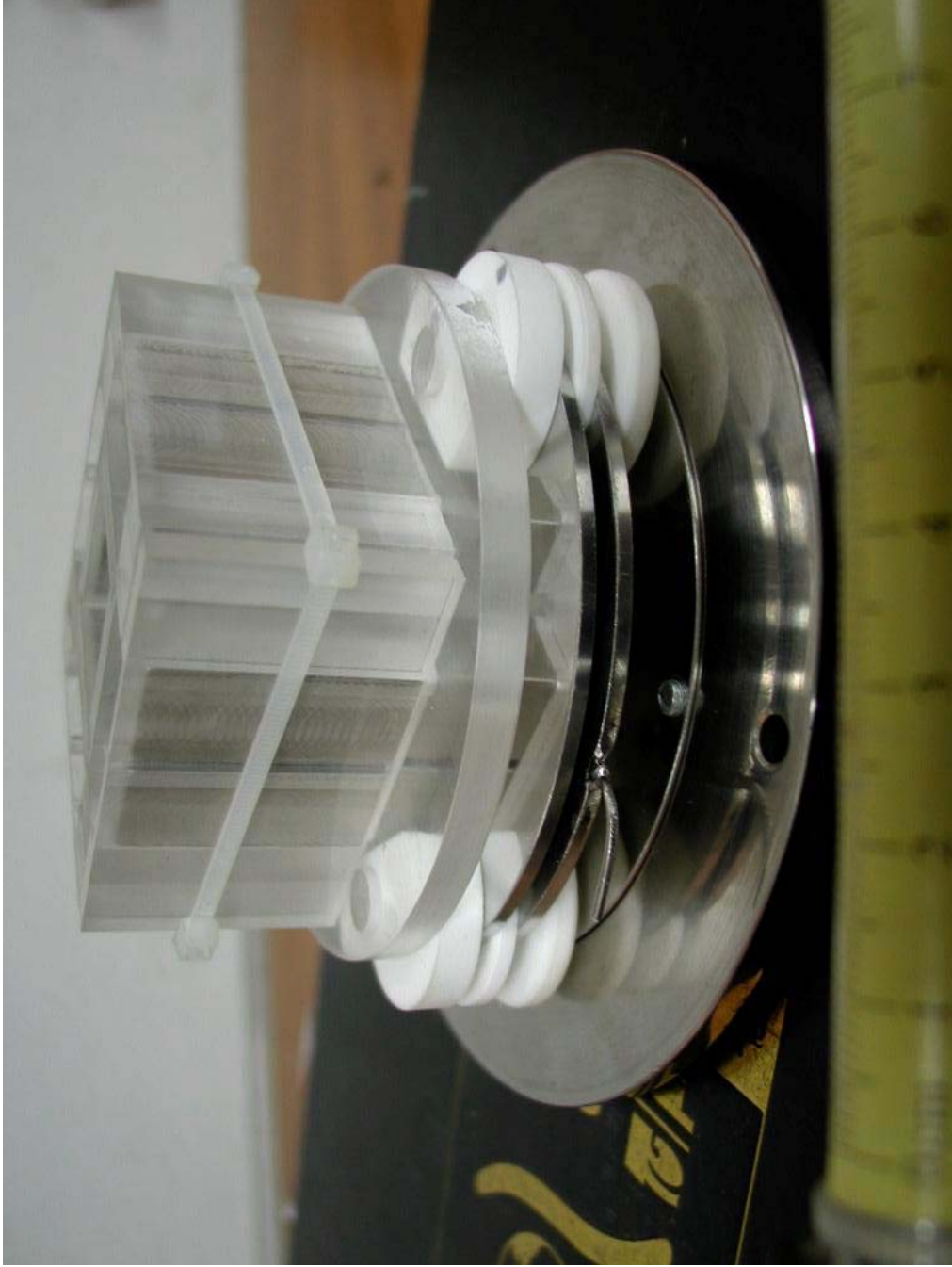
Chiang Mai University  
DATE: 09/17/01

TIME: 14.01

รูปที่ 2.9 แสดงขนาดของบีมอาร์ก่อน 4 ลำ ณ จุดเลยตำแหน่งโฟกัสเล็กน้อย จะเห็นว่าบีมแต่ละลำมีขนาดเล็กลงและใหญ่ขึ้นในแกนตรงข้าม เนื่องจากผลของการโฟกัสในบางแกนของแม่เหล็กไดโพล

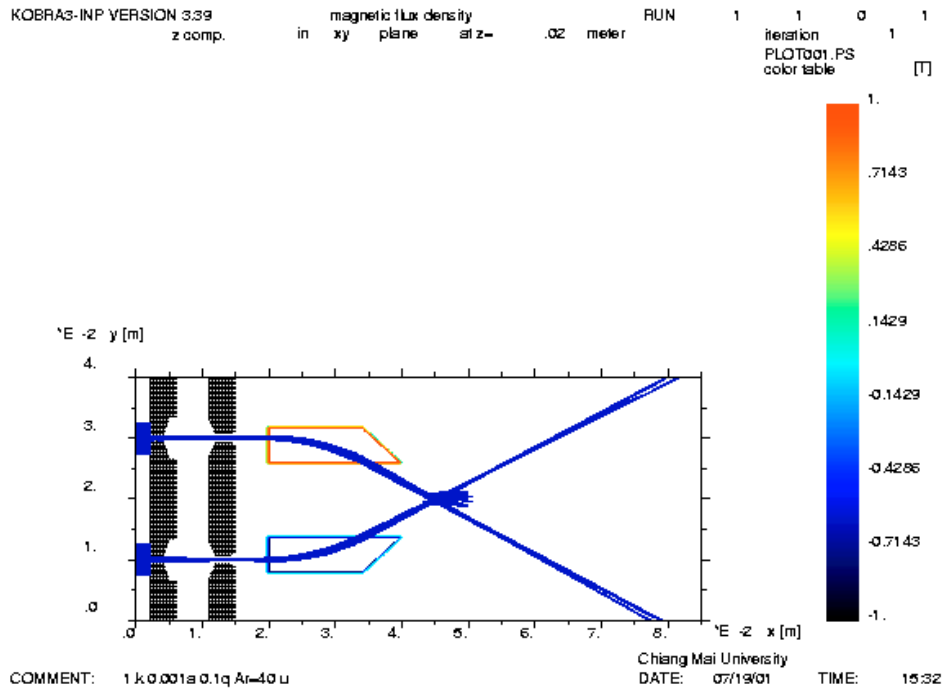


รูปที่ 3.1 แสดงแบบของระบบดึงบีมชนิด 3 ขั้วกึ่งทรงกลม 4 ขั้วเปิดบีมและระบบเบี่ยงบีมแม่เหล็กได้โพล

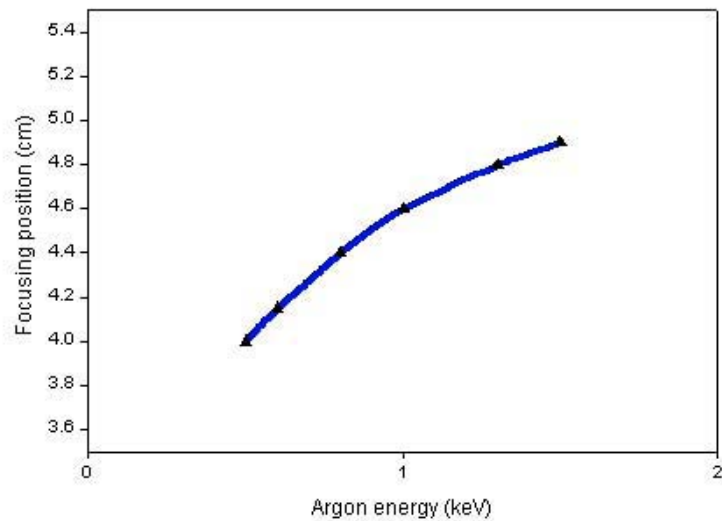


รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายระบบติดตั้งและเบมิมที่ประกอบแล้วเสร็จ

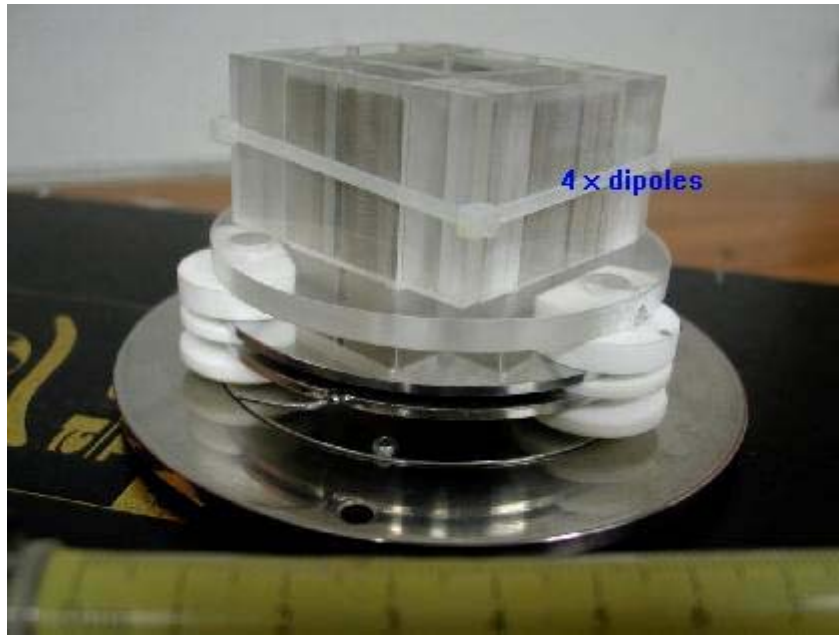




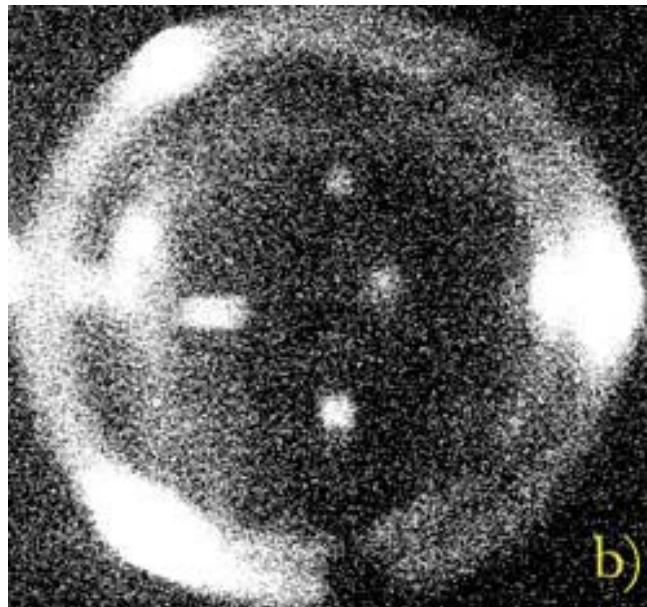
รูปที่ 3.3 ผลการจำลองบีมอาร์กอน 2 ลำ จากระบบดึง ผ่านสนามไดโพล โดยใช้โปรแกรม KOBRA3-INP



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งรวมบีมทั้ง 2 ในแกนนอน ที่พลังงานบีมอาร์กอน 0.5-1.5 keV



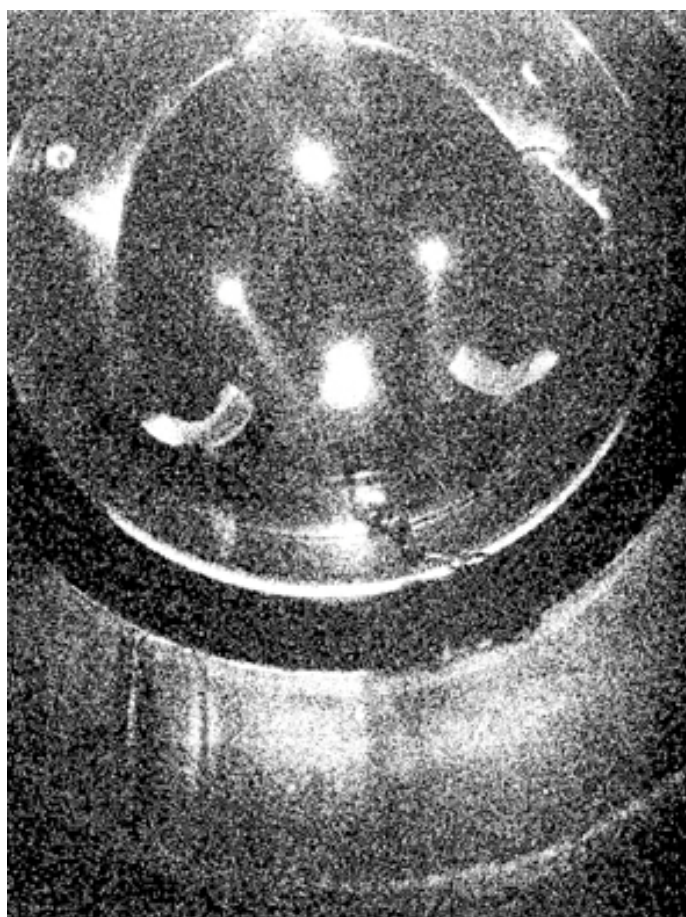
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายระบบดิ่งปี่มชนิด 3 อิเล็กโตรดและเบนปี่มเพื่อโฟกัสแบบแม่เหล็กไดโพล 4 คู่ที่สร้างขึ้น



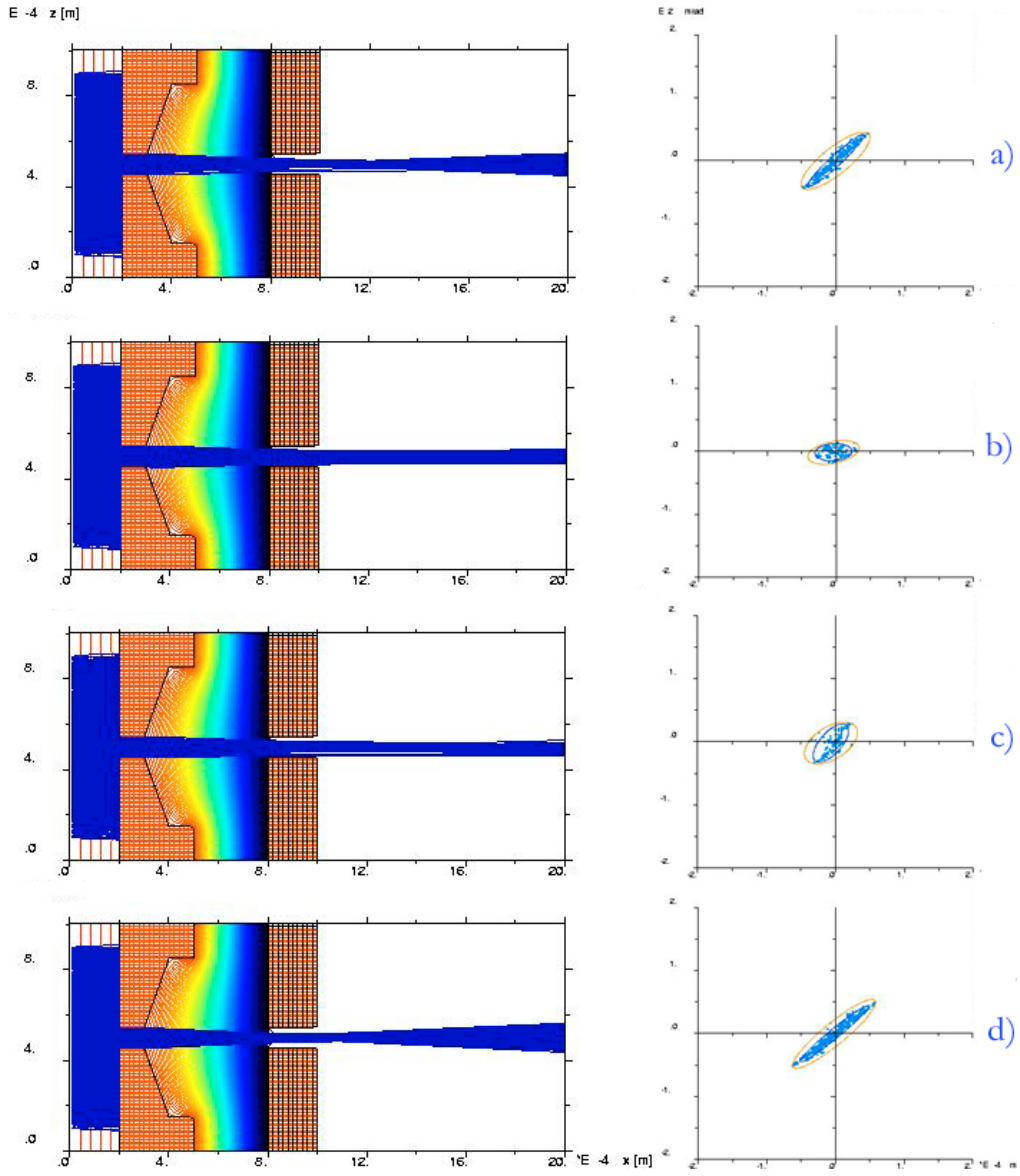
รูปที่ 3.6 ผลการดิ่งปี่มอาร์กอนพลังงาน 1 keV จากระบบดิ่งและเบนปี่มที่สร้างขึ้น พบว่าปี่มมีการกระจายเป็นแถบ



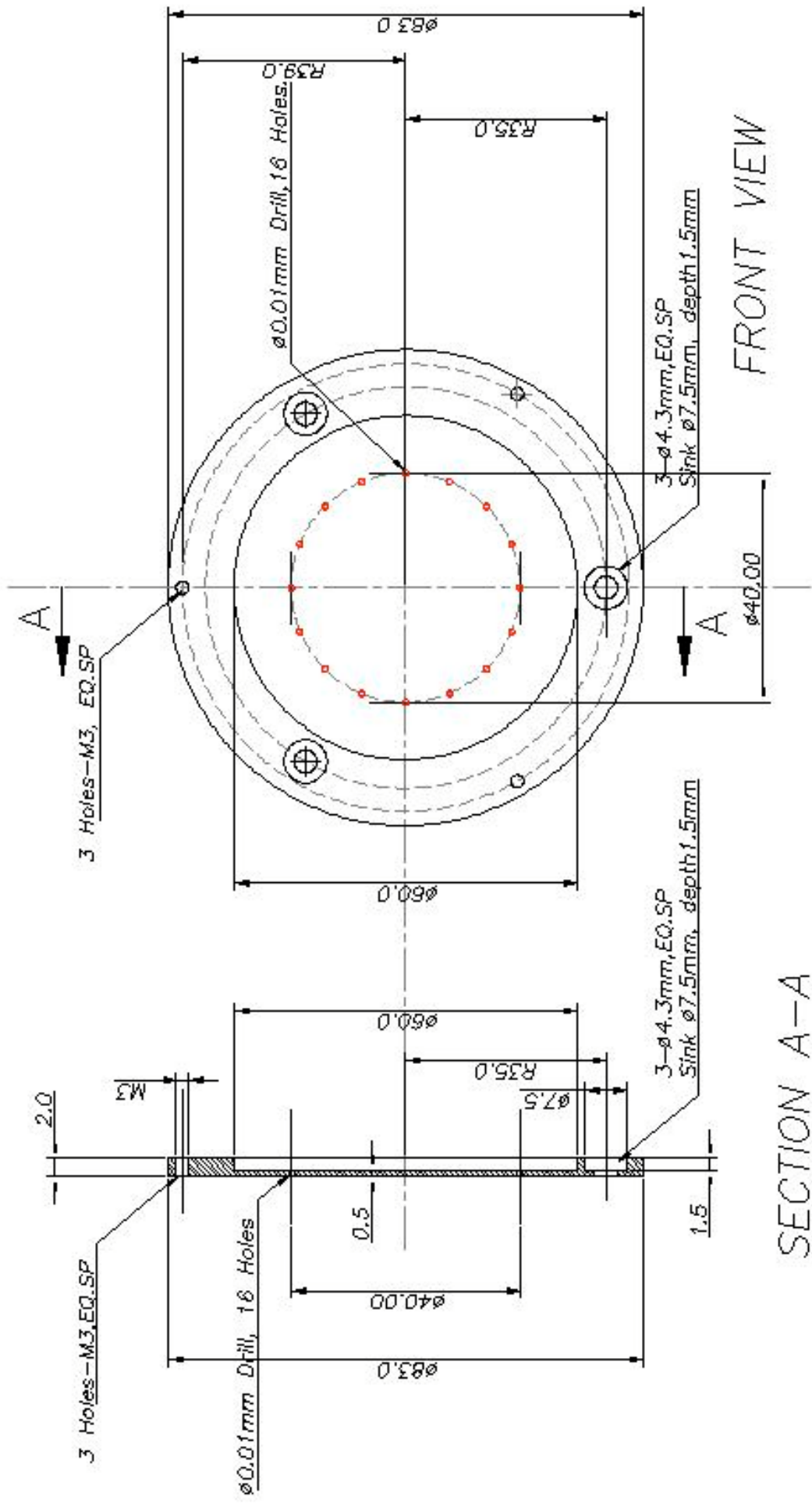
รูปที่ 3.7 แสดงแม่เหล็กไดโพลคู่ที่ติดตั้งใหม่ ให้มี path length เพียง 1 ซม. เพื่อเบนบีมอาร์กอน



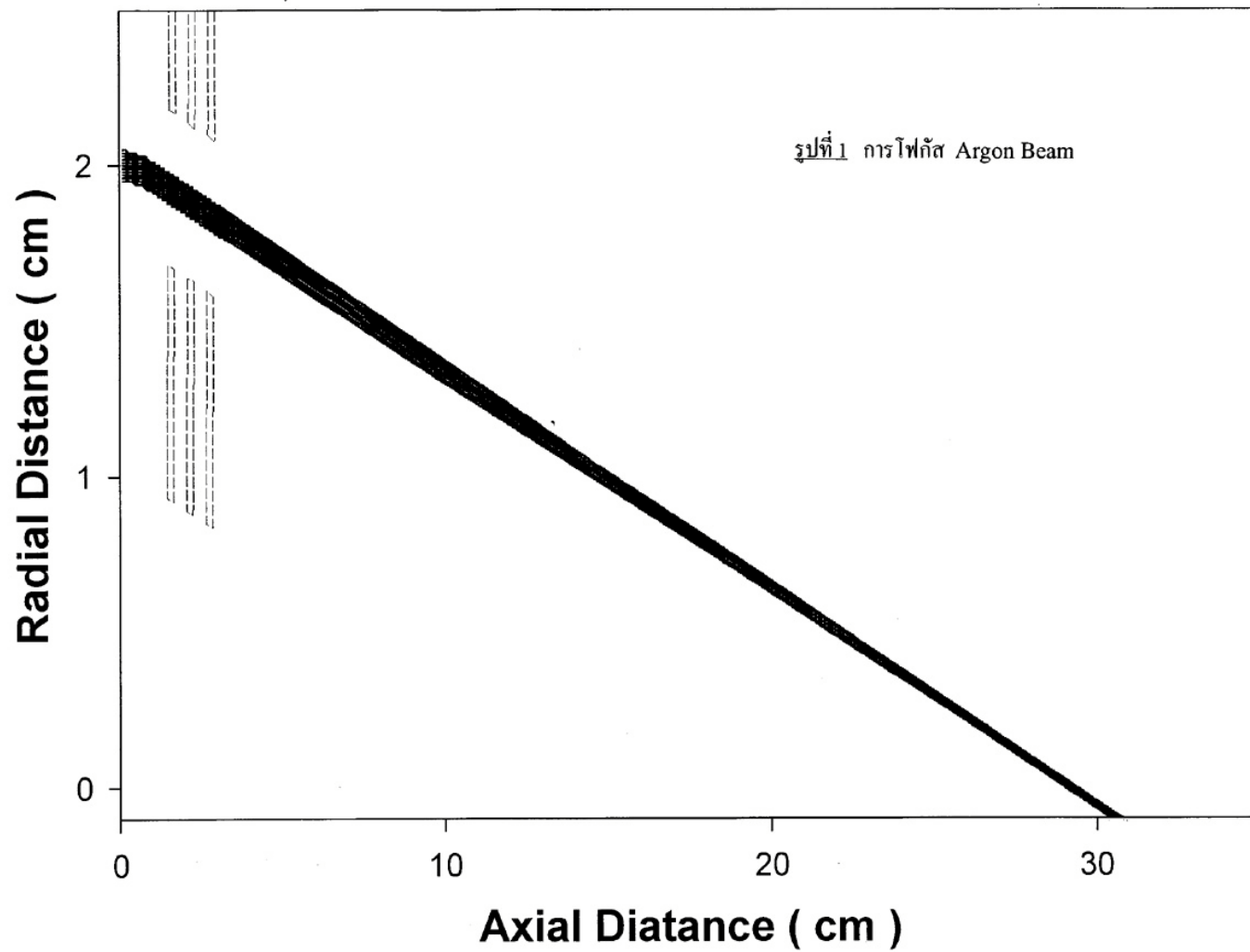
รูปที่ 3.8 แสดงบีมอาร์กอน 2 ลำที่ถูกเบนมารวมกันที่ตำแหน่งรวมบีม จะเห็นว่าบีมแต่ละลำมีการกระจายออก



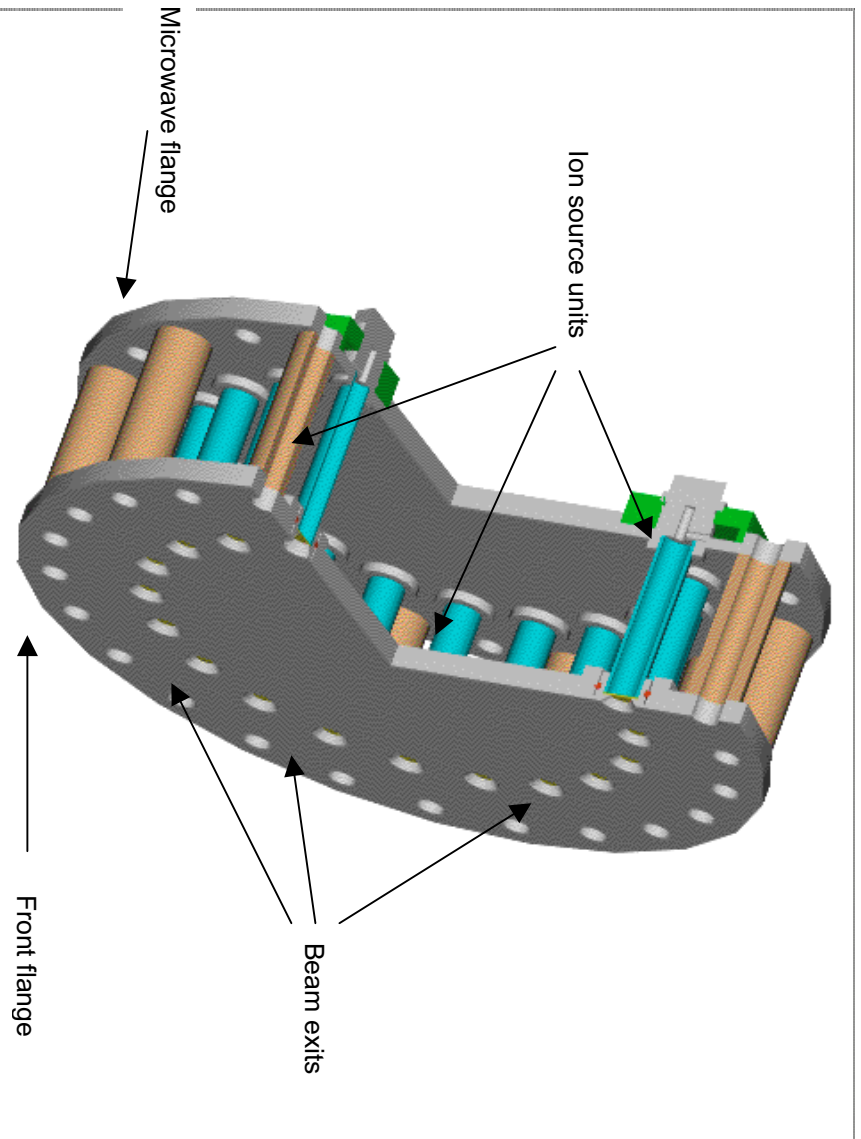
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองพีมอาร์กอนขนาด 100 ไมครอน ผ่านระบบดิ่งชนิด 2 อิเล็กโทรด ด้วยกระแส 1, 10, 100 และ 1000 uA ตามลำดับ



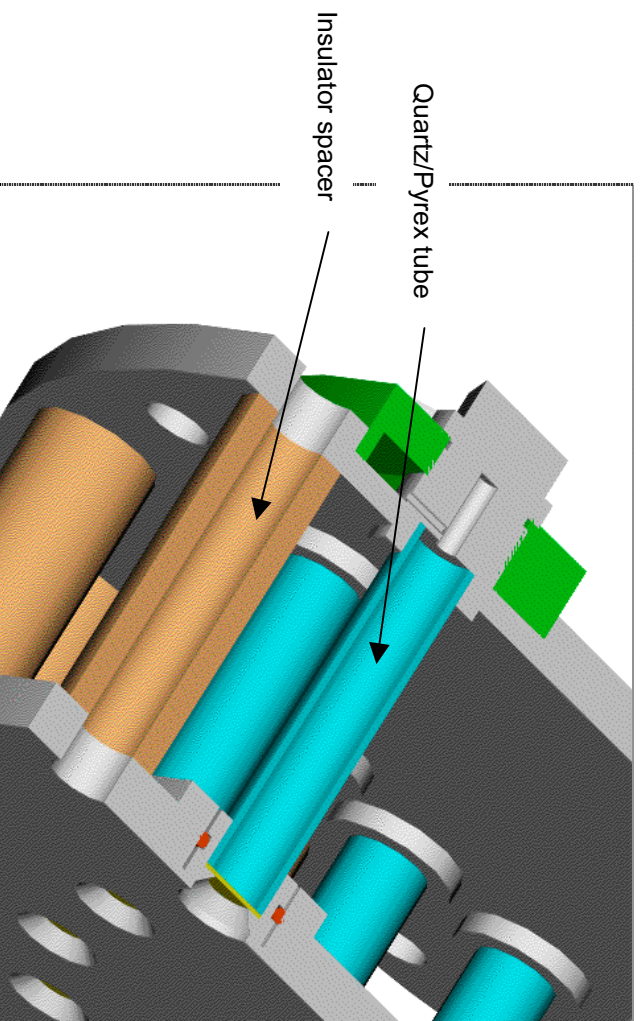
รูปที่ 3.10 แบบของชิ้นอิเล็กทรอนิกส์ที่มี 100 ไมครอน จำนวน 16 รูเปิด บนเส้นรอบวงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม.



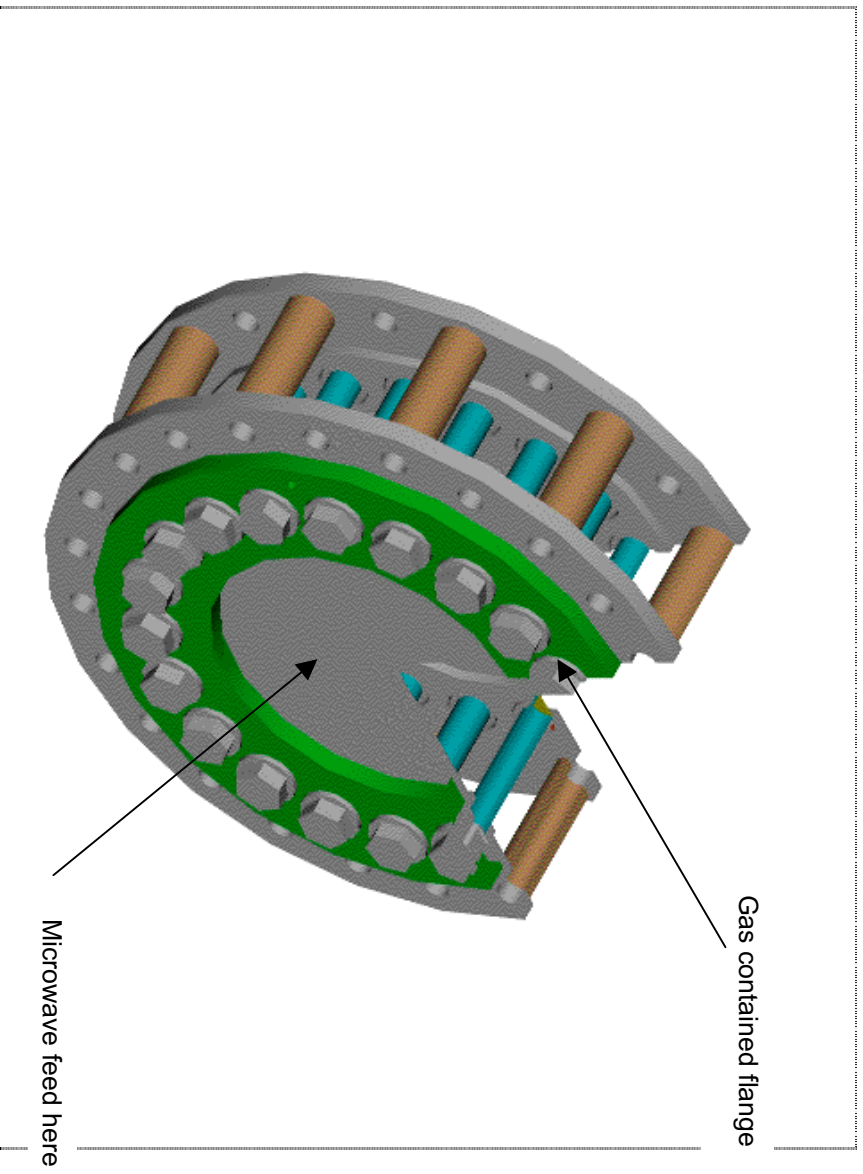
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองบีมอาร์กอนที่เบนผ่านสนามไดโพลเข้าสู่เลนส์ Einzel สามารถลดขนาดบีมที่ตำแหน่งรวมบีมได้ (ไม่คิด space charge)



รูปที่ 4.1. ลักษณะหัวจ่ายไอออนเพื่อผลิตมีมวาร์กอน (ด้านหน้า) ประกอบด้วยหัวจ่ายไอออน 16-20 หัวจ่าย

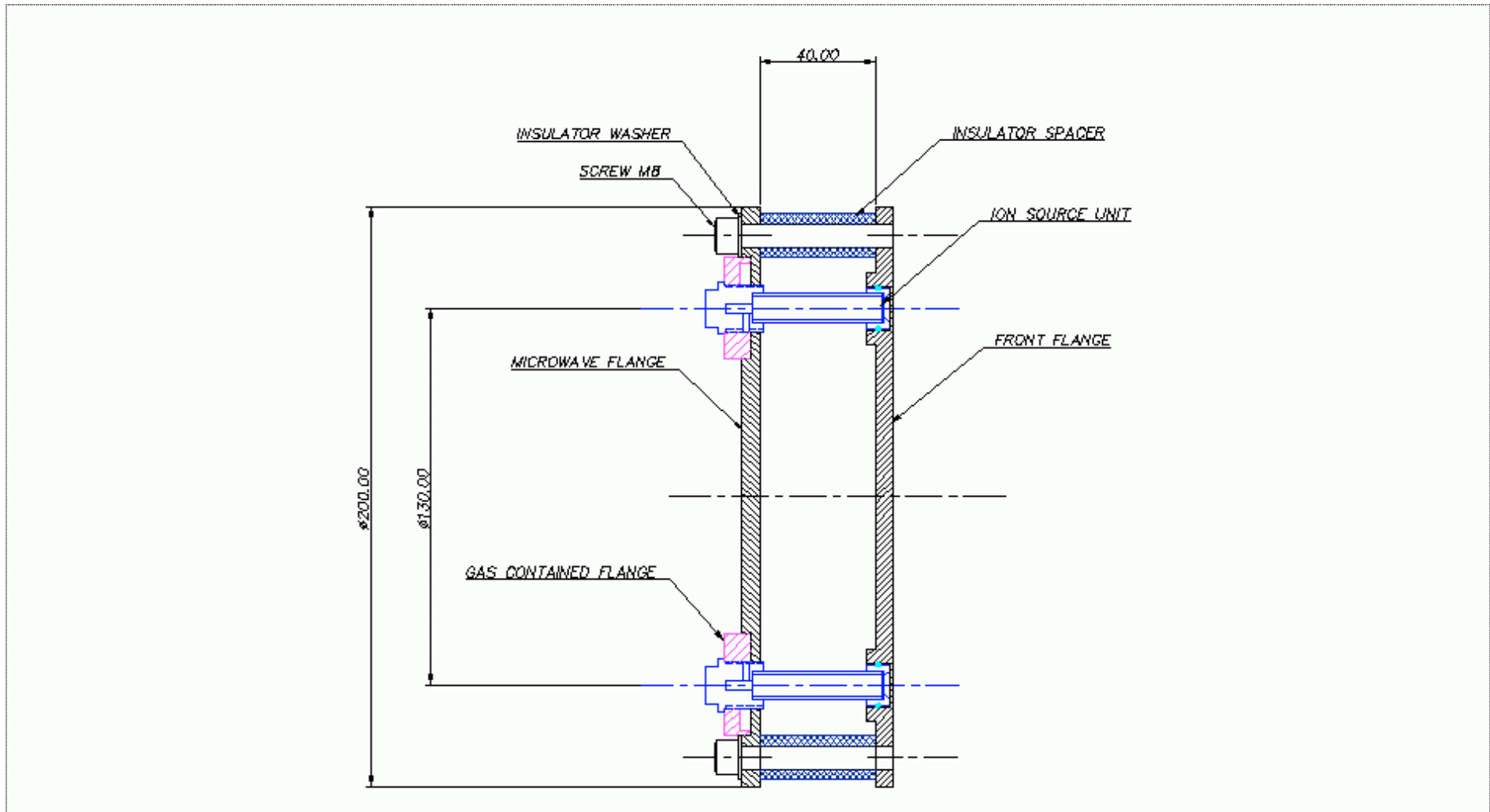


รูปที่ 4.2.ภาคตัดขวางของหัวจ่ายไอออน ขนาดเป็นรูปเปิดมีวาร์กอนขนาด 10-30 ไมครอน ของแต่ละหัว



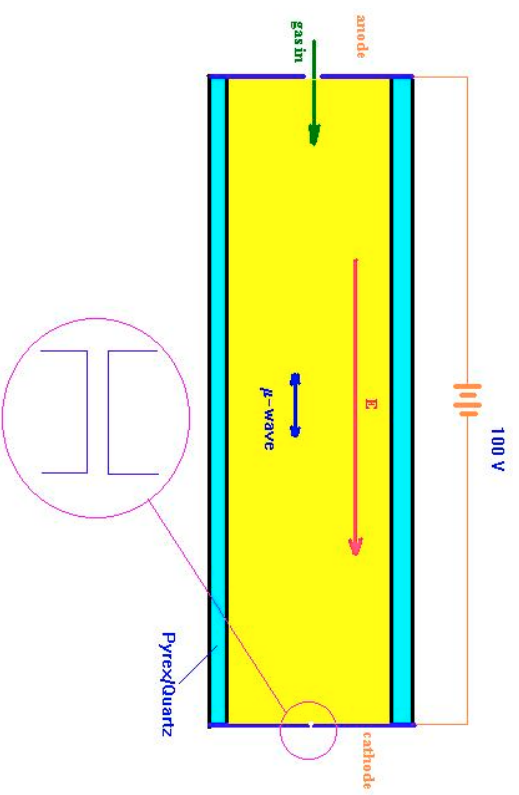
รูปที่ 4.3: ลักษณะหัวจ่ายไอออนเพื่อผลิตปฏิกิริยาอาร์กอน (ด้านหลัง) หัวจ่ายแต่ละหัวถูกจ่ายก๊าซฟลูออรีน





รูปที่ 4.4.แบบของหัวจ่ายไอออนเพื่อผลิตปีมรวมอาร์กอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม.





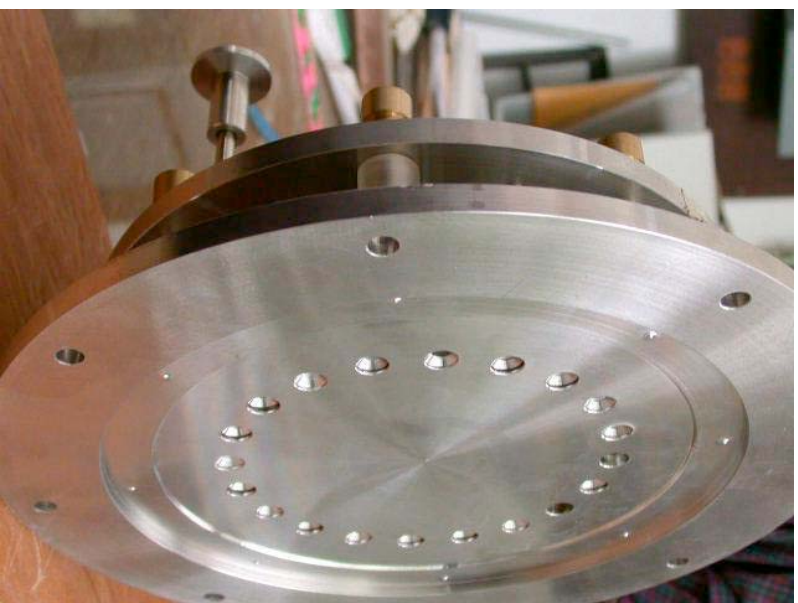
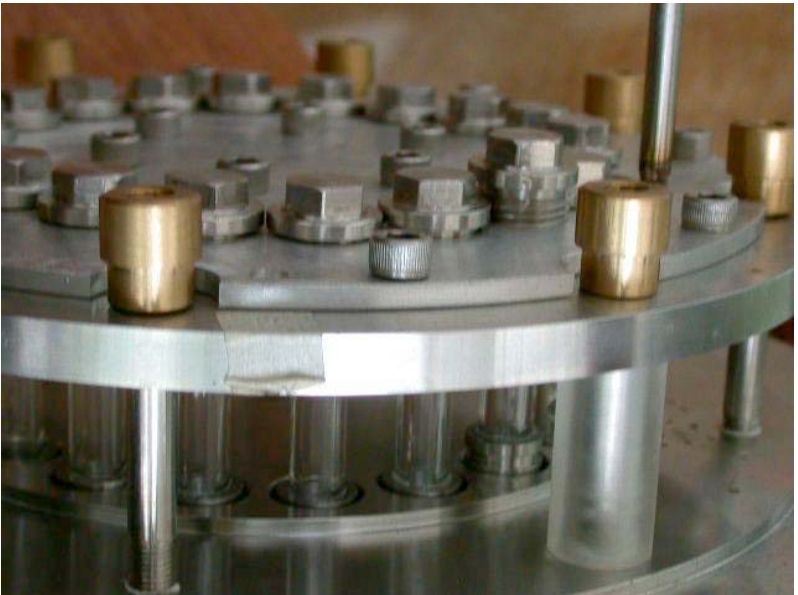
รูปที่ 4.5 แสดงหลักการทำงานของหลอดมาฮาโรทอนในหัวจ่ายย่อย cigar type



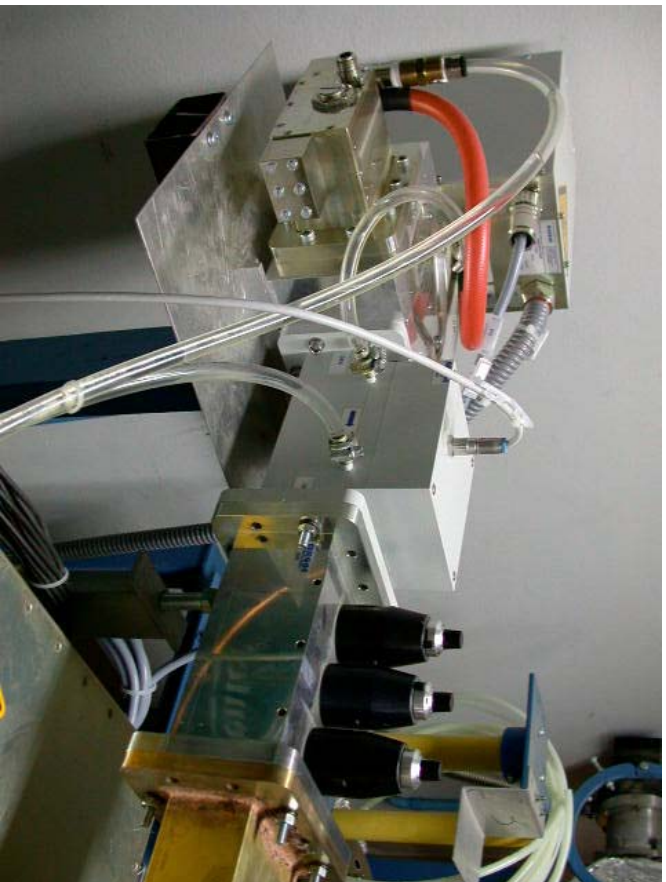
รูปที่ 4.6 แสดงหัวจ่ายย่อย cigar type แต่ละอันรวมทั้งหมด 20 ชิ้น รูปเล็กแสดงรูปเปิดมีขนาด 200 ไมครอน



รูปที่ 4.7 เป็น front flange และ microwave flange ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แสดงด้านหน้าและด้านหลังของหัวจ่ายไอออนที่ประกอบเสร็จแล้ว



รูปที่ 4.9 แสดงการทำเมตโมไดรอป 2.45 GHz พร้อม tuning stub จ่ายกำลังสูงสุดประมาณ 1 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.10 ไมเคิลตรวจจ่ายเพื่อทดสอบแม่เหล็กของไมโครเวฟ ใช้แกนสายโคแอกเซียลเป็น antenna



รูปที่ 4.11 แสดง coupler ด้านแม่เหล็กกำเนิด เพื่อส่งไมโครเวฟผ่านสายโคแอกเซียลให้แก่หัวจ่ายไดออดน