

國家同步輻射研究中心
出國報告書

出國人姓名：張美霞、劉宗凱、蔡啟川

出國日期：2018 年 12 月 09 日至 12 月 17 日

目的地 (國家、城市)：中國、北京

參加會議名稱或考察、研究訓練地點：中國科學院高能物理所

(請自下一頁開始撰寫)

一、目的

此次出國目的為參加 Third Asian School on Superconductivity and Cryogenics for Accelerators, 此學校的課程共七天，主要內容為超導相關工程，包含了應用超導技術的大型設施簡介、超導磁鐵技術、超導共振腔技術以及低溫工程技術。

二、行程

12月09日(星期日) 台灣時間下午 15:25 由桃園中正國際機場搭機出發，於當地時間 12月09日晚上 7:00 左右抵達北京首都機場。之後搭乘專車，在晚上 9 點左右抵達高能物理所的專家招待所。

12月10日(星期一)~12月15日(星期六) 參加 ASSCA 2018 的課程。除了 12/14 與 12/15 有稍微不同的行程外，其他天的行程皆相同，說明如下：

- (1) 每天的 8:30~14:40 為講習課程。下午則有一堂 hand-on training 課程。Hand-on training 以小組進行實際操作，每組每天輪流進行不同的實驗。晚上 19:30~22:00 則是作業討論與自習。課程時程表如下：

Time	Dec. 9, 2018 Sunday	Dec.10, 2018 Monday	Dec.11, 2018 Tuesday	Dec.12, 2018 Wednesday	Dec.13, 2018 Thursday	Dec.14, 2018 Friday	Dec.15, 2018 Saturday	Dec.16, 2018 Sunday	Dec.17, 2018 Monday
07:30 - 8:30 (60 min)	Breakfast								
08:30-08:40 (10 min.)	Arrival Day	Welcome	Information / Announcement					Excursion	Departure Day
08:40-10:10 (90 min.)		Introduction 1 & 2	SC Magnet 1	SC Magnet 4 & 5	SC Cavity 3	Special Talk (SC Magnet)	Cryogenics 1		
10:10-10:30 (20 min.)		Coffee Break							
10:30-12:00 (90 min.)		Introduction 4, 5 & 3	SC Magnet 2	SC Cavity 1	SC Cavity 4	Cryogenics 3	Cryogenics 2		
12:00-13:10 (70 min.)		Lunch							
13:10-14:40 (90 min.)		Introduction 6	SC Magnet 3	SC Cavity 2	SC Cavity 5	Cryogenics 4	Cryogenics 5		
14:40-15:00 (20 min.)		Coffee Break							
15:00-18:00 (180 min.)		Hands-on Training	Hands-on Training	Hands-on Training	Hands-on Training	Hands-on Training	Hands-on Training		
18:00-19:30 (90 min)		Dinner							
19:30-22:00 (150 min.)		Tutorial & Homework	Tutorial & Homework	Tutorial & Homework	Tutorial & Homework	Tutorial & Homework	Exam		

- (2) 12/14 下午 3 點由劉宗凱報告台灣光源與台灣光子源高頻系統運轉簡介。報告完畢後參觀 BEPC II 中控室，之後和高能物理所高頻組部份人員進行 KEKB 型式 SRF module 在運轉上的經驗交流。

- (3) 12/15 晚上 7:30~10:00 進行此次課程的考試。

12月16日(星期日) 白天是 Excursion，晚上為晚宴並進行頒獎。

12月17日(星期一) 於北京時間中午 12:25 搭機飛回台灣。

三、內容摘要

此次 lecture 課程包含四大部份，並有六堂實作的課程。部份的課程內容依序簡述如下：

● Introduction lecture

- (1) ILC 簡介：主要目的在於量測 Higgs 粒子特性，中心能量 250 GeV，正負電子的線型加速器，共需約 16,000 個 9-cell 的 1.3 GHz SRF cavity，平均的 E_{acc} 為 31.5 MV/m，裝進 cryomodule 後性能約降 20%。也有提到 e^+ 的產生方式是使用 undulator 法，優點是可以產稱極化的 e^+ ，但此法在冷卻上有挑戰，因此以傳統方式產生 e^+ 也納入備案。在 e^+ 的 damping ring 中需注意 e-cloud instability。目前可能的位置是在日本的東北地方，整體計畫還在與日本政府協調中。
- (2) CEPC 簡介：中國大陸的環形正負電子對撞機(環的周長約 100 公里)，有三種運作模式—Z pole/flavor/Higgs mode，對撞能量分別為 91、160、250 GeV，目的為產生 Z/W boson (標準模型精確量測、稀有衰變)、quark 與 tau 粒子(量子色動力學的研究)、以及進行 Higgs 相關的精確量測。在 CEPC 運轉多年後可升級為 SppC，此為 100 TeV 的質子對撞機。CEPC 的 booster 採用 1.3 GHz 9-cell TELSA 型式的 SRF cavity，儲存環採用 650 MHz 的 2-cell SRF cavity (製造並測試中)，且採用高效率型式的 klystron (研發中，效率 >80%)。比較特別的是，若運轉在 Z pole mode (能量較低)，是使用兩個環(e^+/e^-)，分別使用各自的 RF 系統，若運轉在 Higgs mode，則兩個環共用 RF 系統 (2 partial ring)，以節省 RF power。真空腔使用 NEG coating 的方式減少 SEY。目前此計畫的 CDR 已完成，接下來將進入 TDR 的階段，預計 2022 年完成。
- (3) SHINE 簡介：SHINE 上海 2018 年開始進行建造的 Hard X-ray FEL，共有 3 條 undulator lines 與 10 個實驗站，光能量涵蓋的範圍在 0.4-25 keV，長 3.1 公里，電子能量 8 GeV。使用的 undulator 是 planar(FEL-I)、planar + EPU(FEL-II)與 SCU(FEL-III)。建造費用由地方政府支付 80%的預算，約 150 萬美金，其餘費用由中央政府支付。高頻系統採用了 9-cell 1.3 GHz TESLA 的 SRF cavity，操作在 2K 的環境，另外也使用了 3.9 GHz 的 harmonic cavity。預期在 2025 年可供用戶使用。
- (4) ADS 簡介：核電是一種乾淨的能源，全球有 10.5%的電力是核電。但核電的缺點是會產生核廢料以及鈾元素會用光。ADS 是使用加速器產生高能量質子處理核廢料，讓核廢料衰變成半衰期

短的廢料，同時也可以利用質子撞擊的技術產生可使用的同位素，也可以產生中子源。目前此計畫有 4 期：關鍵技術的研發、初始的設施、demo 設施以及實際應用設施，每期 5 年。目前預計位置在廣東惠州。

(5) PAPS 簡介：PAPS 是先進光源技術發展平台，包含高頻、低溫、磁鐵、束流測試、X-ray 的光學、偵測與應用等的研究開發，預算為 5 億人民幣，由北京市政府支助，建造時程為 2017-2020 年。最主要的工作是以 SRF 的製造、測試、研發為主，為了應付未來中國大陸各項加速器相關計畫，包含 HEPS(166 MHz 與 500 MHz SRF)、CEPC(650 MHz SRF)、CiADS、CSNS upgrade、SHINE(1.3 GHz SRF)。同時也介紹了相關的 SRF 生產相關的各種設備與測試平台，例如不同等級的無塵室、垂直測試槽以及共振腔後處理的設備。

(6) 超導與 cryogenic 在加速器中扮演的角色：這堂課概略介紹了超導體的特性以及歷史發展，也介紹了超導體在加速器上的應用—超導磁鐵與超導共振腔，同時也介紹了低溫系統與低溫工程。最後則是介紹了亞洲目前與未來使用超導技術的加速器設施。

● SC 磁鐵 lecture

(1) 超導性與超導材料：介紹超導體，以及各種超導材料，包含低溫超導以及兩種系列的高溫超導材料—氧化銅系列與鐵基材料。低溫超導常用的是 NbTi 與 Nb₃Sn，可用 BCS 理論分析，臨界溫度小於 40 度。高溫超導體常見的有氧化銅系列，臨界溫度高，無法用 BCS 理論解釋，且有個應用上的缺點，若是 grain 間有大於 5 度的 mismatch 角度，兩個 grain 間的電流密度會大幅下降。另一種鐵基的高溫超導材料，這種 mismatch 的臨界角度約為 9 度，且 ABC 三個軸方向上的 H_{c2} 差異較小，因此鐵基材料有應用上的潛力。目前超導體的研究上有兩大方向，高溫超導的理論基礎以及室溫的高溫超導材料。

(2) 超導體在超導磁鐵上的應用：介紹各種常見的低溫與高溫超導線，以及相關製造的技術。Commercial 的產品有鈮合金(NbTi、Nb₃Sn)，第一代的高溫超導體(Bi₂223、Bi₂212)，以及 MgB₂。Pre-commercial 的有 YBCO(第二代的高溫超導體)，另外在實驗室研發階段的有鐵基的超導線。選用線材時需要考慮到製造成本以及材料的特性。這堂課也廣泛的講述了上述超導線與 tape 的製程方式與特性，以及鐵基材料線圈的發展(鐵基材料的優點是製造較容易，20K 的 H_{c2} 可達 70T，較近似於 isotropic，H>20T 時有較高的 J_c，而且可用 PIT 的方式製成，商業化上較省成本)。

- (3) 加速器超導磁鐵：環型對撞機用加速器的磁鐵需要高磁場，因此需要高磁場的磁鐵，超導磁鐵是比較合適的選擇。這堂課前半段簡單介紹環型對撞機，以及對撞機用的磁鐵設計以及超導磁鐵在這方面的應用。同時也有講述如何針對磁鐵失超進行保護，如增加 external resistor 加快消耗儲能、使用 protection heater 讓磁鐵失超時均勻加熱等。另外也有講述超導磁鐵的 flux jump 以及其他相關的問題。後半段的課程則針對 CEPC 對撞機的超導磁鐵進行個案的分析，目前大陸已完成 4.2K 10T 的 dipole 磁鐵製造並成功測試(CEPC 用)，等未來鐵基線圈技術成熟後，SPPC 將會使用鐵基的高溫超導線設計製造 20-24T 的超導磁鐵。
- (4) 超導 wiggler 與 undulator：主要講述超導插件磁鐵的概要，線材以 NbTi 與 Nb₃Sn 為主，也同時介紹這兩種線材的超導特性。這堂課也說明了插件磁鐵磁場對於射束動力的影響、線圈的設計、磁場的分布等，同時也介紹不同型態的 wiggler 與各光源實際的應用、wave length shifter 與 undulator 的基本介紹。最後則是講述了超導插件磁鐵的低溫系統。
- (5) 探測器與其他超導磁鐵：高能物理實驗的探測器用磁鐵，主要用於分辨粒子的電荷，進一步分析粒子的種類。這堂課講述了探測器用磁鐵的概念、原理、設計以及製造。因需要強磁場，目前高能物理的探測器磁場約為 1~5 T，縱向方向的磁場，所以需要超導磁鐵。常見的探測器磁鐵類型有 Solenoid、Toroid、dipole(較少)。同時針對 BESIII 與 CEPC 的探測器進行 case study，包含磁鐵設計製造、低溫系統以及磁場量測。課程後半段則是介紹超導磁鐵在其他非加速器領域的應用，如 MRI。
- (6) Super KEKB 對撞區的超導磁鐵：這堂課是 special talk，講述了對撞機對撞點區域的磁鐵。因為要提升 luminosity，對撞的截面積要小，且對撞的 bunch 要多，所以這區域的磁鐵設計對磁場與各方面的要求都很高。此區的磁鐵用於 focus 與 defocus，使用了超導 quadrupole，而為了抵消 detector 螺線管強磁場對電子軌道的影響，也會需要補償用的螺線管。此堂課介紹了上述磁鐵的設計製造、組裝與磁場量測結果，也包含了相關的低溫系統。所有的磁鐵都工作順利，下次的運轉大約在 2019 年 3 月開始。

● SC 共振腔 lecture

- (1) 超導 RF 理論：說明超導體的特性，以及 SRF Q-E plot。同時進一步使用微觀波函數，講述超導性的特性，包含 cooper pair、

Meissner effect、flux quantization、vortex、critical field 以及 superheating field，也有計算 quality factor 及 SRF 相關的特性。

- (2) RF-cavity 與 beam-cavity 的 interaction：講述 6 種 RF 相關的理論，涵蓋的內容相當多，包含了馬可斯威爾方程式、微擾理論(用於場強的量測)、Bethe 理論(small hole coupling)、RF 電路模型、beam loading 理論以及 wake field 理論。馬克斯威爾方程式的講述也包含微波工程對於 cavity 與 waveguide 的電磁場計算，電路模型則是把 RF 系統當作是 RLC 電路處理，另外同時也講述了多種 RF 量測方法。在 wake field 理論的部份，也探討了不穩定性，包含 collective instability 與 Robinson instability。
- (3) Input coupler 與 HOM damper：這堂課介紹了 input coupler 以及 HOM coupler 與 HOM damper，這些都是高頻系統中很重要的元件。Input coupler 部份，課能包含了簡介、功能、設計原理、功率計算、製程、測試與高功率鍛煉等，同時也介紹了 IHEP 在這方面的發展，因應各種類型的共振腔，IHEP 也設計製造了不同頻段的 input coupler。HOM coupler 與 damper 的功能，主要是要減少被束流激發出的高次模，HOM coupler 是透過 coupler 將高次模引出，HOM damper 則是 beam pipe 上加了吸波材料吸收高次模。課程涵蓋了不同類型 HOM coupler 的簡介、設計概念與優缺點比較，以及 HOM damper 使用的材料、製程方式等。
- (4) LLRF 與 RF 操作：這堂課講述了 LLRF 的型式(類比、半數位與數位)、實現的技術，以及如何利用轉移函數分析 LLRF 系統的穩定性。另外也提及了幾項 LLRF 需要注意的項目，如 microphonic、beam loading、RF power noise (來自高頻發射機)、master clock 的 noise 等。在 interlock 的部份，介紹了 arc 與 quench 的保護方式以及校正方式。在硬體的部份也有簡介北京以及上海發展的數位 LLRF 控制器，最後則是講述了 RF 系統的操作，以及幾個光源的 RF 系統的幾個 trip 現象。在這堂課的最後則是簡單介紹了上海光源。
- (5) Cavity 與 tuner：這堂課主要在講述如何設計與製造好的共振腔模組，包含如何設計共振腔、共振腔的製程、影響共振腔效能的因素以及如何避免，例如設計腔體結構減少 multipacting、透過無塵室組裝與超純水清洗減少共振腔表面的粒子數以降低 field emission、進行 BCP/EP 減少表面粗糙以及去除表面的汙染、800 度的退火減少氫(Q-disease)、120 度的烘烤降低高 field 的 Q-slope 等。另外也介紹了 tuner 的設計，包含 step motor 與

pizeo。最後則是總節在設計上的重點：保持 $B_p < 60 \sim 70$ mT 的情況下，讓 E_p 越小越好、設計上要滿足容易組裝以及方便進行 BCP/EP 與超純水清洗。

● Cryogenic lecture

- (1) 低溫工程：這堂課簡單介紹低溫工程的基本原理以及常用的相關理論，包含 Coefficient of Performance、Figure of Merit、J-T coefficient 等等。另外也提及如何選擇共振腔的操作溫度、製冷機的操作模式(Liquefaction mode、Refrigeration mode、mix mode)、2K 的冷卻方式(warm compressor、warm compressor + cold compressor、cold compressor)，最後則是以 BEPCII、ADS、CEPC 與其他大型設施的低溫系統當作例子進行說明，並介紹所使用的儀器。
- (2) Cryo-module design：這堂課簡單介紹了如何設計 cyro-module，從低溫槽的需求開始(操作溫度、heat load、安全性、振動等)，進一步介紹如何根據需求挑選適合的材料(考率熱傳遞、熱膨脹等)，另外也介紹了熱的傳遞方式—接觸、對流與熱輻射，以及針對這些熱傳進行熱的隔絕。最後則是介紹各個設施的 cryo-module，以及針對 ADS 與 CEPC 的 cryo-module 進行 case study，包含設計、參數、結構等等。
- (3) 低溫理論：這堂課先簡單介紹了 cryogenics 的發展、演進、應用以及材料在低溫下的特性，之後則是詳細講述低溫製冷的方式，先從基本的熱力學定裡開始，進一步介紹 isenthalpic 與 isentropic expansion，包含了計算兩種膨脹的效率以及介紹 J-T cooling 的原理。之後則講述不同 thermodynamic cycle 理論(Linde cycle 與 Claude cycle)，以及在 T-s 圖上的表示與實際設備的應用，另外也說明如何進行氦的液化，以及 2K 系統的實現方式。第四部份則介紹了低溫系統常見的設備及工作原理，包含壓縮機，oil remove 系統、cold box(含熱交換器與 turbo expander)以及低溫系統的控制。課程的最後一部份則是介紹了小型製冷設備(cryo-cooler)的工作原理。
- (4) IHEP 的大型低溫設施：這堂課介紹了在 IHEP 的低溫設備，包含 BEPC-II、ADS 注射段 1、中國散裂中子源、PAPS、HEPS 與 CEPC(預期 2022 開始建造)。BEPC-II 有兩區域需用到低溫系統，分別為超導共振腔以及探測器的超導磁鐵，因此由主壓縮機後共有兩路 transfer lines。ADS 注射段 1 使用了 2K 的低溫系統，總共的 heat load 約為 660W (at 4K)。散裂中子源使用液態氦，溫度為 20K，包含了氦的 refrigerator (cooling power 為

2200W at 20K)，以及氫的循環系統。PAPS 共需要 7 路的低溫管線，提供三個垂直測試站、兩個水平測試站以及一個運轉測試站的低溫使用(含 2K 系統)。HEPS 的液氮系統提供給超導共振腔使用，beam lines 與加速器需要液氮供 CPMU 以及其他低溫設備使用，需要極大的液氮 cooling power，且液氮的低溫 transfer line 估計為 2000 m，是一個很大的挑戰。CEPS 部份，總共的 total heat load 約為 48 Kw at 4K，需要 4 座各 18kW at 4.5K 的 refrigerators。

● Hand on training

Hand on training 共有六門課，分別是簡介如下：(1)練習磁鐵線圈繞線與超導態下的臨界電流量測。(2)超導體的 RRR 量測，但這實驗因為儀器故障而沒有進行。(3)RF 表面電阻的量測，實際上是透過量測 power、 Q_L 等參數並換算成 Q_0 後，再由給定的 G 值推算出表面電阻。(4)Cavity RF 量測，使用微擾法(beat ball)進行量測，同時也有利用網路分析儀，進行各個 port 的 Q_{ext} 與 coupling 的量測。(5)溫度量測與校正，利用標準曲線對溫度 sensor 進行校正。(6)低溫絕緣 support 量測，利用一個測試平台，量測選用的 support 材料在低溫下可承受的張力，同時也測試不同材料的低溫下的特性(楊式係數、導熱等)。

● 與 IHEP 高頻組(孫毅、戴建秤以及兩位學生)交流 KEKB 型式的運轉經驗：

- (1)IHEP 只有在有電流時才會施加 bias voltage (+1500 V)，沒有電流時不會添加 bias voltage。沒有 bias voltage 時，在低電壓 ($V_c \sim 900$ kV) 有時也會有真空事件，但 CW 的 aging 幾次都可以通過，不會太困難，這部份與同步的狀況有點不同。
- (2)IHEP 建議在常溫時的 CPL aging 要仔細做(bias \pm 1800 V，每 100 V 做一次，power 到 100 kW~150 kW)，之前上海光源因為 warm aging 沒做好，降溫後 0.9 MV 處就有強烈的 multipacting，後來就把 window 打破...
- (3)IHEP 對於低溫下的 CPL aging 沒有很注重，必要時才進行些微的 CPL aging，作法為在 $V_c=2$ MV 左右進行掃 loading angle，掃 5~10 分鐘左右。IHEP 對於 clod CPL aging 比較不注重，而且沒必要時不會進行，因為 IHEP 覺得低溫時從 coupler 出來的氣體會被 cavity 吸附，這會降低 cavity 的 performance。IHEP 也會趁著低溫系統故障時(短時間可修復的情況)進行 partial warm up，但目的不是改善 coupler 的 multipacting 的現象，而

是要降低在 cavity 上吸附的氣體，而實際上經過 partial warm up 後 cavity 真空的確有比較好。而當低溫或其他系統有需要長時間維修時，IHEP 則會把 cavity 回溫到室溫，並針對 coupler 進行 warm aging。

- (4) IHEP 回溫與降溫各只要約 60 小時，因為 IHEP 的降溫速度約為每小時 6K。
- (5) IHEP 曾經發生 coupler window 破掉的情況，當時的處理方式，是透過在氦氣管注入 100 度氦氣，在 cavity 外部加溫，將吸附在 cavity 表面的氣體趕出來，經過這樣處理後，很幸運地 cavity 的性能有回復。但 IHEP 也說這作法很危險，這對低溫系統以及模組銅封處來說有相當大的風險。
- (6) IHEP 沒有發生 cavity Q 值明顯降低的現象，量測時大約都在 10% 上下，都還在量測的誤差範圍之內。
- (7) IHEP 在進行 cavity 的超純水清洗時，沒有監控水中的粒子量，也沒有可判斷是否清洗乾淨的依據。但已有建立標準流程，只要照著標準流程進行超純水清洗，cavity 的 performance 都不會太差。

四、心得概述與建議

這次的學校課程內容豐富，部份都與自己所做的相關，且能同時學習到其他領域的知識與技術，以及進一步瞭解中國大陸加速器的發展，收穫頗多。不過這次部份的課程內容還是比較艱難一點，雖然有作業與自習時間，但因為課程題材內容很多，吸收還是有限。

除了學習上的心得外，這次的課程讓我們看到中國大陸在加速器領域上的企圖心，許多大型設施的計畫不斷推出，如 ADS、HEPS、CEPC 等大項目，且許多關鍵技術也逐漸成熟，也自行研發出各種頻率的高頻超導共振腔，在加速器磁鐵以及低溫系統的設計製造上也有不錯的成果。也許看看大陸的發展，可以激勵我們自己的士氣與想法。

參加這種加速器學校還是有不少收穫，也可增廣見聞。建議中心若經費許可，可多鼓勵年輕的同仁參加。

註：

1. 本報告須於回國後 30 日內上網繳交，文字篇幅約 2~4 頁。
2. 回國後之口頭報告可為附件，但不得替代報告本文。