ICCF24学术笔记

张武寿 于 2022年8月30日星期二

目录

1. 晶格能量转换器(LEC)及类似装置	3
1.1. LEC	3
1.2. 其他直接产生电能的装置	9
1.3. 讨论	11
2. Pd-Ni(Cu -Ni)合金-H(D)系统	11
2.1. Pd-Ni-Zr 和 Cu-Ni-Zr 粉末系统	11
2.2. Cu/Ni 和 Pd/Ni 膜系统	
2.3. 康铜(Cu ₅₅ Ni ₄₄ Mn ₁)丝	21
3. Pd-H(D)系统	21
3.1. Pd-D2O 系统	23
3.2. Pd-H ₂ (D ₂)系统	27
4. Ni-H 系统	31
4.1. Ni-H2O 系统	
4.2. Ni-H2系统	
5. 核嬗变,核产物	
5.1. 印度理工学院坎普尔分校(IIT Kanpur)的电解核嬗变	
5.2. 其他体系的核异常	41
6. 束靶反应	43
7. 其他系统	46
8. 仪器方法	48
8.1. 热测量	48
8.2. 核产物测量	
9. 各种理论模型	
9.1. 经典理论的应用或扩展	51
9.2. 团簇	
9.3. 重电子,小氢原子,中性粒子	
9.4. 各种耦合和增强效应	53
9.5. 更激进的理论	53
10. 结论	54

2022年7月25-28日,第24届国际凝聚态核科学会议(ICCF24,https://www.iccf24.org) 在美国加州硅谷Mount. View的计算机历史博物馆举行,本次会议是人类世研究所举办的, 会议分现场和远程两种模式。美欧的学者以现场参会为主,中、日、俄学者多远程参会。

这次会议的商业化味道浓厚,负责会议现场和远程直播的都是专业主持人,不像以前由 资深学者轮流主持会场。会议间隙中说唱歌手Baba Brinkman以《冷聚变复兴》(Cold Fusion Renaissance)为题进行了宣传(见下图0.1)。



图0.1: Baba Brinkman的Cold Fusion Renaissance。

会议第一天内容带有政治性和商业性。因为对碳排放的关注,本次会议有多篇摘要和报告谈到该问题,如犹他大学S.C.Bannister讨论了碳排放的增长及LENR对经济和地缘政治的可能影响等问题【A4】,国际能源署(IAE)前执行主任田中伸男(Nobuo Tanaka)以"全球能源危机与碳中和挑战"为题发表了演讲。美国能源部先进能源计划署(ARPA-E),美国科学与创新高级顾问兼首席聚变协调员办公室和项目主任Scott Hsu介绍了ARPA-E的LENR研讨会及公开召集合作伙伴名单的计划,这是去年10月下旬能源部举行LENR研讨会后的结果,该资助的目的是验证LENR的科学性,打破前期工作中"科学性不足而无法获得承认——无法获得承认所以无资助——无资助所以无法得到具有足够科学性结果"的恶性循环。此次能源部吸取了Google公司1,000万美元计划"踢开党委闹革命"的教训,明确要求每个小组必须有多年研究冷聚变的科学家参加,以发表盲审论文获得科学界承认为最终目的。2021年,美国国防高级研究计划局(DARPA)已同时资助了海军和陆军两家科研单位独立重复Pd共沉积系统中超热、核辐射和电磁辐射,印象中这是DARPA第一次资助冷聚变研究。

此外欧盟地平线2020(European Union's Horizon 2020,欧盟的研究和创新计划,总预算 近800亿欧元)中CleanHME Project(洁净氢金属能源计划,参见:http://www.cleanhme.eu/) 已资助了德、法,意、波等共16个单位的冷聚变研究。这次波兰的Czerski小组有5人参会, 4人做报告,一改以前形单影只的景象。可以说美欧已经走在了最前列。

本次会议上授予Storms丰田奖,这是Fleischman于2009年ICCF15上获此奖后的第二人, 说明大家对他多年研究的认可。

此外,此次会议安排了一个在线短训班,是冷聚变的入门内容,课程与演讲者见下表0.1。

c I	Presenter	LENR Topic
	Nagel	Introduction and Issues
- T	McKubre	Electrochemical Loading
- Experiment	Narita	Hot Gas Loading
	Forsley	Plasma Loading
	Storms	Calorimetry and Heat Data
Results	Biberian	Transmutation Data
	Imam	Materials Challenges
a Challenges	Hagelstein	Theoretical Considerations
	Katinsky	Commercialization
Payons	Rothwell	Applications and Impacts

表0.1: 2022年LENR短训班内容。

LENR Short Course 2022

To find these presentations on YouTube, search with "ICCF24" 美国T.W. Grimshaw介绍了冷聚变研究文档倡议(LRDI)的进展,犹他大学的Marriott图书馆对此项目有特别兴趣,将把这些文档作为特别馆藏【A28】。

ICCF25将于2023年在波兰什切青(Szczecin)大学(USZ)举办。

现在分不同系统介绍本次会议的技术内容。系统的分类是粗略的,且带有任意性。

文中介绍到具体内容时用【A#】的形式表示其在摘要集中的页码,如【A27】表示摘要 集第27页(电子页码)。本笔记是结合摘要、报告视频、墙报和相关文献综合而成的。笔者 无法把所截图表中内容全部在正文中表述,请读者多从图表中获取有用信息。所有内容以原 作者表述为准,特此说明。

1. 晶格能量转换器(LEC)及类似装置

本次会议中晶格能量转换器(Lattice Energy Converter, LEC)受到重视,第三天下 午有4个报告集中讨论LEC,另有3篇相关墙报。2009年罗马ICCF15上笔者第一次见 到法国 F. David 报道聚变二极管可直接产生电流,去年厦门ICCF23上美国Entenmann's 和 Inovl 公司报道参与该技术研发,把器件改名为LEC。Inovl 的一个LEC已连续工作8年, 说明他们已研究了很长时间。

1.1. LEC

Inovl 公司的 F. Gordon 和 H. Whitehouse 报道了 LEC 最新进展【A27】(JCMNS 35 (2022) 30–48)。LEC 结构及实验装置如下图 1.1 所示,经验表明只有在水溶液中电沉积形成的载氢 材料 (hydrogen host material) 作为工作电极才能在 LEC 上产生电压,电镀液是 0.03 M PdCl₂ + 0.3 M LiCl 溶液。Pd 镀在外径 1/4 英寸的紫铜管上,对电极是内径 3/4 英寸的黄铜管。如 果工作电极靠近对电极但电压表未显示电压,那就需要把工作电极再放入镀液继续沉积 Pd, 直到能产生电压为止。实验前先抽真空然后充入氘气。因为气体不导电,需要用 6 μCi 的 Am-241 源 (6 个烟雾报警器的 Am-241 用量) 放入管中预电离气体。后面即使取出 Am-241 源, 试管仍可导电。能产生效应的试管中气体导电性要好于无效应试管中的。此外还记录到小于 2 ms 的电压脉冲,如下图 1.2 所示。



图 1.1: Inovl 公司所用的 LEC 及电路图。



图 1.2: 持续记录 8 s 时间内显示的电压脉冲。

使用氢气和氘气都记录到电压,充入空气时电压开始衰减,但好几天后仍有电压,应该 是逐渐脱氢的结果。为了避免水蒸气的影响,在-55℃条件下测量不同负载时的 I-V 特征曲 线,结果如下图 1.3 所示。把该图的电流用对数表示(见下图 1.4),可见低压极限值是 28 mV。当温度升高时,电压也相应提高,如图 1.5 所示。其他结果见图 1.6–1.8 及其说明。



图 1.3: - 55℃下不同负载时的 I-V 特征曲线。



图 1.4: 图 1.3 的半对数表示。



图 1.5: 在 936 kΩ负载情况下电压从 25℃时的 10 mV 升高到 185℃的 525 mV。



图 1.6: 三种温度下的电压,负载电流和桥接电流。可见在很宽的负载电阻范围内,电流为 常数,该行为类似于放射性衰变、热电子发射或光电效应。



图 1.7: 按图 6 数据得到不同负载条件下的输出功率。在最近一次实验中,从 27℃增加到 171℃时输出功率增加 6 个量级。



图 1.8: 一个自启动和自维持的 LEC 电池示例,该电池在 4 天内改变了三次极性。LEC 电压 最初为负,随着温度升高变为正值。当温度降低时,LEC 电压回到负值,然后逐渐增加到正 值,而此时温度保持相对恒定。电压为负值和正值时进行的负载测试类似于化学电池的负载 测试,在多个 LEC 电池中观察到类似的行为。原因尚不清楚,尽管一种可能性是材料的功 函数随着氢负载的变化以及电极表面受到电离辐射而变化。

目前 LEC 只有 10² nW/cm² 的功率密度,需要放大 7 个量级才能到 1 W/cm²,为此他们 确定了 5 个方向: 1.通过改变材料组分和形态增加电离辐射; 2.提高气体密度(初始压力) 以增加气体电离; 3.改进 LEC 构型以提高气态离子收集效率; 4.升高温度以增加输出功率; 5.增加电极表面积。在这些工作中,需要: 1.识别工作电极发出的电离辐射的来源和类型; 2.确定对电极在电离气体中可能起的作用; 3.识别并优化产生离子的气体和混合物; 4.分

析 LEC 内的气体离子物理过程。

对于上述最后一项工作,Whitehouse 和 Gordon 已建立模型进行数值模拟,物理过程可 用四阶非线性微分方程描述。初步结论是气压越高,离子密度也越高。最佳功率输出取决于 离子种类,如果以电子为主,则小间距有利;如果是质子和α粒子,则大间距有利【A98】

现在有三个小组重复了他们的工作,分别是法国的 Biberian 小组【A12】,意大利的 Di Stefano【A20】和美国 LANL 的 Erickson【A60】,下面分别叙述。

法国 J.-P. Biberian 小组用直径 2 mm,长 10 cm 的 Pd-Ag 棒与外径 6 mm 的世伟 洛克不锈钢管封闭氢气(氘气)时无任何效应,但用 PdBr₂ 溶液在 Pd 棒上电沉积一 薄层 Pd 膜后产生了直流电,在外接电阻为 10 MΩ时电压最大达 0.33 V(相对外壳 都是负值,下同),电阻为 2 MΩ(笔者目测值)时输出功率最大达 16 nW。把钯棒 换成面积更大的同轴不锈钢管后,再外接 2 MΩ电阻时电压最大达 0.74 V,电阻为 0.6 MΩ(笔者目测值)时输出功率最大达 4.5 μW,输出功率增加了 2 个量级。他们 还发现温度升高,输出也增加(见下图 1.9)。在高温部分,输出功率对数与温度倒 数的斜率——即活化能——为 0.23 eV/atom。实验的主要问题还是输出电压(见下图 1.10)和功率不稳定,多数随时间衰减。施加 0.2 Tesla 磁场,直到 6 Hz 也无效应 【A12】。



图 1.9: Biberian 的 LEC 输出电压随温度的变化。



图 1.10: Biberian 的 LEC 输出电压随时间的变化。

意大利的 A. Di Stefano 利用两个同轴的黄铜管,管长 100 mm,内管外径 4 mm, 内外管间隙 0.5 mm(见图 1.11)。内管先作为阴极镀铁,1/4 的 20%HCl 加 3/4 自来 水制成电解液,软白铁丝为阳极,平均电流密度为 1 mA/cm²,电解电压小于 0.5 V, 电解 8 h。前 6 h 可见阴极析氢,后 2 h 可见生成黑色 Fe 镀层【A20】。



图 1.11: Di Stefano 所用 LEC 结构示意图。

作者发现只有这种用氢与铁共沉积形成的工作电极可在内外管之间产生电压和 电流,工作电极只用黄铜管时在 10±5μV 误差范围内无电压,加压到±60 V 时在± 0.5 nA 误差范围内无电流。用铁棒电解吸氢当工作电极时无效应。活化的内管在空 气气氛中也有效应,因为生锈,只能维持一天,而氢气中可维持几天的功夫。

分别用黄铜管、铝管和紫铜管作对电极,结果发现铝作对电极时电压变成正值,如下表1.1所列。因此作者认为所测电势只是不同材料间电极电势或功函数的不同, 主要效应是气体的电离,而所测电势只是气体电离后的次级效应,即电流更具有代 表性,因气体离化需要10—20 eV的能量,已超过化学能,所以该效应是非化学的。

表 1.1: Di Stefano 不同"工作电极-对电极"条件下的开路电压和短路电流。

Open	circuit voltage (I	mV)	Short	circuit current	t (uA)
Brass-Brass	Brass-Al	Brass-Cu	Brass-Brass	Brass-Al	Brass-Cu
-307	223	-234	-2.4	1.5	- <mark>0.6</mark> 9

外壳是黄铜时可产生 0.3 V 的电压和几个微安的电流,在外加±10 V 电压时,可产生 0.15 mA 的电流 (见下图 1.12),该电流就是饱和电流。



Forced current (from -10 V to +10V)



图 1.12: Di Stefano 的 LEC 改变负载时的电压变化 (左图) 和不同外加电压时的电流 响应 (右图)。

作者用该 LEC 为一个 100 μF 的电容充电,电压随时间变化如下图 1.13 所示, 拟合可求得电源内阻为 150 kΩ,时间常数 15 s,充入能量 4.7 μJ。



图 1.13: Di Stefano 的 LEC 为电容充电过程中电压随时间的变化。

用盖革 LND712 计数器未测到核辐射,说明不是普通的α、β和γ辐射,或者辐射 能低于 1 keV,或者只从部分热点辐射出来。总而言之,输出功率比实际输入功率高 6 个数量级,实验重复性很好,该装置类似于核电池(betavoltaic battery)。

美国 LANL 退休的 Erickson 与 Inovl 公司合作,重复了 Pd-H LEC,在空气中观察到 1 MΩ负载时输出电压超过 0.35 V。他已构建并评估了十几个不同结构的 LEC (见图 14),实现了输出电压高达 0.7 V,最高真空操作温度达 200℃,压力达 30 psig (约 2 atm)的空气、 氩气和氢气下运行的各种 LEC。他还尝试了各种核测量,但摘要中无具体技术细节,笔者向 Erickson 去信索要更详细的墙报内容,他回答说自己被迫退出会议,也未完成墙报【A60】。





图 1.14: 左图是 Pd-H LEC; 右图 LEC 开有测量辐射的云母窗 (Mica Window)。

1.2. 其他直接产生电能的装置

最早实现 Pd-H 系统电流输出的 F. David 现在与美国德州一家公司合作。这次他报道 了两点,一个如下图 1.15 所示,输出电压最高达 0.9 V,电压随时间下降。另一个是用 硅晶片两面分别真空镀钯膜和金膜,见下图 1.16,具体结果只能等待后续报道了【A57】。



图 1.15: David 的最新聚变二极管结果。



图 1.16: David 的最新实验装置。

新西兰盖娅能源公司(Gaia Energy)的 G. Egely 报告了"LENR 的直接电能输出",与前面的技术路线不同,他主要基于上世纪早期其他人(包括 A. Chernetskii、P. Correa 和 K. Shoulder 等)的专利和报道制作尘埃等离子体放电装置直接产生电流的方法,其原理连载于

2017 和 2018 年第 133、135—137 期 Infinite Energy 杂志上。试管可持续输出 1 ± 0.5 kW, 功率密度达 10 kW/kg【无摘要】。目前尚属于新奇技术路线。

1.3. 讨论

对于 LEC, Storms 在 CMNS 论坛上发言,估计电离辐射是次级效应,就是薄膜表面发射出的带电粒子电离了气体,可用类似于气体正比计数管的方法表征。笔者估计图 1.2 所示的电压脉冲可用冷聚变中的猝发式粒子产生来解释。其实是否为次级效应还可通过热测量来部分解答,把 LEC 放入量热计中,通过比较 LEC 的热功率与负载电阻上电功率可确定,热功率远大于电功率时肯定是次级效应,否则就是初级效应,当然,这对量热计灵敏度有要求。

1995 年乌克兰的 Shmal'ko 等人就已经综述了利用金属氢化物形成激发态氢的实验(J. Alloys. Comp. 231 (1995) 856),在新鲜 Pd 催化剂表面的吸放氢过程中观测到很高的单原子 氢发射,氢从钯等过渡金属中放出时伴随有质子以及少量的氢分子离子(H₂⁺)发射,而碱 金属和碱土金属氢化物的离解会放出 H⁻。氢从金属氢化物中放出时比在平衡态氢气氛下的 电离截面增加 30—50%,对应于势垒降低 0.3—0.5 eV。当时他们就想到该效应与冷聚变的 关系。

总而言之,目前的实验表明,载氢金属薄膜可以电离气体并产生电压,本身类似于核电 池,电压随温度,电极种类,负载等条件而变化,实验本身重复性高,但稳定性不好。该器 件中发生的过程需要冷聚变——即电、热、核辐射、核产物等——的关联测量,也需要物理 化学——如在不同气压下研究载氢金属表面离子发射过程,气相中离子输运理论模拟等—— 多方面研究。这些过程明确后,其能源利用前景也就清楚了。

2. Pd-Ni(Cu-Ni)合金-H(D)系统

日本 Technova 公司对 Pd-Ni 和 Cu-Ni 合金的研究本身在不断深入,还有两个小组独立 重复了其结果,而美国 Beiting 重复水野忠彦和 Technova 公司的结果都是失败的;日本两单 位对 Pd/Ni 膜的探索有助于这类材料的机理突破;而康铜丝不再是 Celani 的自说自话,这次 报道了加拿大小组的重复结果。

2.1. Pd-Ni-Zr 和 Cu-Ni-Zr 粉末系统

日本 Technova 公司的长谷川雅彦(M. Hasegawa)报道了 D 系统(应该是 C 系统的升级版)中 CNZ(即 Cu-Ni-Zr)在氢气中的超热,材料还是 Cu₁Ni₇/ZrO₂,40—150 g,先反复煅烧然后进行量热实验。最近实验的最显著特点是量热的同时用气压变化测量 H/Ni 比,结果发现在加热几分钟后材料迅速吸氢并吸热,然后很快放热,超热可持续几十个小时。此后几天内(30—70 h)H/Ni 持续增加并远远大于 1,超热稳定。此后进入下降期。超热为 25—35W,比超热为 200—280 W/kg【A31】。一例超热如下 图 2.1 所示,可见超热主要是 Ni 显著吸氢时才有。他们还发现了在超热减小后,通过打开阀门 RCV(应该是 remote control valve,遥控阀)促使样品快速脱氢可再次激发超热,一例如下图 2.2 所示(图中 Ps 是反应釜外管路中的气压)。高桥亮人也报道了类似的结果,并用自己的 4H/TSC 理论给与解释【A46】







图 2.2: Technova 公司 D 系统中超热减小后通过释放氢气再次激活超热【A31】。

日本早稻田大学的小林知嵩(Tomotaka Kobayashi)和内藤健(Ken Naitoh)等人的工作仍是去年 ICCF23 报道基础上的延续,装置见下图 2.3。使用 3.0 g Technova 公司提供的 Pd-Ni-Zr 合金粉,充入 0.12—0.9 MPa 的氢气(对照组是氮气),初始温度 95—240℃。这次在装置上加了个电磁阀(Solenoid valve)实现气体的脉冲流(pulsed flow),结果表明无脉冲流时温升只有 12.4 K,有脉冲流时可达 35.0 K(见图 2.4),笔者曾去信详询脉冲流的特征,小林知嵩说要等论文发表后才能透露【A72】。



图 2.3: 早稻田大学实验装置结构图。



图 2.4: 早稻田大学的实验结果。

西安秋然实验室张航(由陈思代讲)用 Ni-Pd 合金粉末-氢(氘)气系统验证了日本 Technova 公司的多次氧化对超热的影响。用 40:1 的 Ni+Pd 混合粉末 200 g, 球磨 60 h 后冷 却,干燥后放入反应釜。先抽真空,然后充入 500 kPa 的氢气,分段按 10、20…50、100…300 W 在约两天时间内逐步增加热功率,然后抽真空,再充入 300 kPa 氘气,分段输入最高到 300 W 热功率,然后是充入 1 atm 空气,如此反复。结果发现随着粉末氧化次数增多,超热 逐渐增大,最大超功率为 2 W,出现在第三次氧化以后输入功率 250 W(反应釜 383℃)时。 这与日本 Technova 公司多次煅烧促进超热的结果一致,详见下图 2.5【A17】。



图 2.5: 西安秋然实验室 Ni-Pd 合金粉在 $H_2 和 D_2$ 中不同氧化次数后不同输入功率下的超热 【A17】。

Excess Heat vs Temperature



图 2.6:法国 Biberian 小组用纳米 Cu-Ni 合金在氢气中得到的超热,图中 X 轴最大显示 950℃, 实际到达 935℃; Y 轴超热最大显示 3.5 W,实际值到 3 W 左右【A11】。

法国 J.-P. Biberian 等人用纳米 Cu₁Ni₇ 合金粉末,用一个 20 或 30 mm 直径的石英管做试管,用 Kanthal 丝绕在试管外加热,试管外再覆盖以高温水泥,把这个试管放入 63 mm 直

径,150 mm 高的真空管内,真空管用 CF63 法兰连接分子泵。真空管外是 50 对 K 型热电偶 组成的双层套,最后整体放入恒温水浴中。该量热计可在低功率下达到高温,准确度到 0.15 W。他们研究了各种纳米镍合金和氧化物载体,结果表明温度对超热有影响(一例如上图 2.6 所示),并可得到活化能(图像不清楚,应该是一点几 eV/atom)。他的重要经验是因为 Ni 吸 H 是吸热反应,所以需要升温到 200°C以上,此外表面氧化物阻止吸氢,所以需要先去除。这两个问题可用高温氢处理同时解决。首先把粉末放入试管,在真空下输入 5 W,输出信号稳定后再增加 5 W,如此反复直到最高温度(<1,000°C),然后再分步降低输入功率直到室 温为止,这也是量热计的标定过程,共需要 4 天时间。然后引入氢气,像在真空中一样,加热到最大功率,然后抽真空,输入功率递降到无。有氢气情况下要等超热稳定后再变化功率 【A11】。因视频分辨率不高,本文只放了一张图。

美国的 M.R. Swartz 在这次会议上投了三篇摘要【A45,A89,A90】,会议上除口头报告外还有三篇墙报。第一篇摘要(也是口头报告内容)论述氘在空穴位的占据促进了冷聚变中的质-能传递【A45】。另一篇摘要论述电化学阻抗谱可以鉴别 ZrO₂PdNiD NANOR®型组件的活性【A89】。还有一篇讨论氘气中的电行为【A90】。一篇摘要讨论了超声波作用下ZrO₂PdNiD NANOR®型组件直接产生直流电,但未看到具体的正面结果。NANOR®型组件是他注册的冷聚变材料。

G.H. Miley 小组的 B. Peecher 报告了触发加压纳米颗粒中 LENR 的方法,他们先在液氮 温度下球磨 Pd-Zr 和 Pd-Ni-Zr 合金形成富含缺陷的纳米颗粒,最简单的触发方法是超过 600℃ 的高温,但超热不高。另一种触发方法是用线圈加热,通过 ns 级 kV 电磁脉冲来触发。但只 有摘要,未见到更具体内容【A86】。

美国水瓶座能源公司(Aquarius Energy)是斯坦福大学几个学者和学生创立的,致力于 实现无可辩驳原则证明(Irrefutable Proof of Principle)的冷聚变实验,J. Dodaro 介绍了他们 的实验装置,见下图 2.7 和 2.8。使用 Pd-Ni 合金纳米粒子负载于碳纳米管上,通入氢气(氘 气),用 2—35 THz 拍频的激光激发实验,用 RTD 测量温度,用硅探测器测量带电粒子,用 高分辨谱仪直接测量氘气中 0.1 ppm 以上含量的 ⁴He。整个装置像化学中的微流反应器,目 前尚无正式结果【无摘要】。



图 2.7: 水瓶座能源公司实验装置示意图(视频分辨率不高,所以不太清楚)。



图 2.8: 水瓶座能源公司的制样过程(视频分辨率不高,所以不太清楚)。

美国 Beiting 小组未能成功重复水野实验【A8】。其装置如下图 2.9—2.12 所示,与水野 不同的是他们用了液流量热计,反应釜外套保温层再外套铜管换热(见下图 2.11),铜管直 径 6.35 mm,然后绕成直径 10 cm 的螺旋,铜管之间焊接,出入口用 K 型热电偶和 Pt100 测 温,再外套保温材料。用丙二醇(propylene glycol)换热,流速约 6 ml/s。他们直接使用水 野提供的 2 片 30 cm×30 cm 蹭钯镍网(约 28 g),每次实验使用一片,按水野的报道应该产 生 100 W 超热。样品先在 80℃下用蒸馏水超声清洗 12 min,剪成 10 cm×30 cm 的三片,然 后用乙醇清洗。从报告的标定结果看,到 55 W 时误差为± 0.25 W。实际测量结果在 0.5 W 范围内无超热,输入功率最大 55 W,反应釜最高温度到 322℃,氢气压力 526 Pa。他们还 试验了日本 Technova 公司的 CNZ 配方,材料为 Cu₁Ni₇Zr₁₄,粒子直径 20—38 μm,未加压 的样品自然密度为 1.9 g/cc,空气中 450℃下加热 170 h(7 天),样品从灰色变成黑色,说明 氧化了,质量增加 33%。Zr 变成 ZrO₂ 后质量增加 26%,说明 Zr 都氧化了,也未测到超热。



图 2.9: Beiting 小组重复水野实验装置示意图【A8】。

Scale Drawing Of Reactor Used For Mizumo Test



STAINLESS STEEL REACTOR WAS CUSTOM BUILT FOR MINIMUM MASS TO REDUCE THE TIME TO REACH THERMAL EQUILIBRIUM. ALL DIMENSIONS IN MM

图 2.10: Beiting 小组重复水野实验的反应釜【A8】。



Scale Drawing of Copper Tubing Reactor in Calorimeter



图 2.11: Beiting 小组重复水野实验的反应釜与换热管路【A8】。

图 2.12: Beiting 小组重复水野实验的结果【A8】。

2.2. Cu/Ni 和 Pd/Ni 膜系统

日本东北大学电子光理学研究中心(ELPH)凝缩核反应研究部的伊藤岳彦(T. Itoh)、 岩村康弘(Y. Iwamura)和笠木治郎太(J. Kasagi)分别报道了他们工作的最新进展【A33— 35】。还是用 Ni 做基底的 Cu/Ni 纳米多层膜,先烘焙,然后在 250°C 条件下充入 200 Pa 氢 气并维持约 15h 以充分吸氢,然后加热并抽真空,维持加热功率恒定,可观测到热猝发(见 下图 2.13)。用中红外、近红外和可见光三种光谱仪测量光辐射,结果发现光谱变化得出的 超热功率与热电偶测温得到的一致,但不同猝发热情况下,可见光与近红外光谱强度有区别 (见下图 2.14),说明不同热猝发的性质不同【A33】。笔者以为,这些区别需要用核测量或 产物测量来佐证,如此才能揭示其原因。



Experiment 2 Correlation between light intensity and near-infrared intensity(2)

在实验中,他们有意变化加热功率以刺激超热产生,成功的结果如下图 2.15(a)所示,结果激发出 4.8 kJ,峰值约 10 W 的超热;而未激发出超热的结果如图 2.15(b)所示,即加热功率在下降 3 min 后恢复【A34】。

图 2.15: 变化热功率激发 Cu/Ni 多层膜超热结果【A34】。

他们还比较了氢气与氘气的区别(见下图 2.16 和 2.17)。在输入功率 34 W 的条件下, 比较了氢气,氘气和真空三种情况下的热辐射光谱,结果发现氢气和氘气结果相同,都比真 空条件下辐射强度提高,说明产生了超热。且氢气和氘气结果差别不大。他们还测量了 H 和 D产生超热的活化能,大概都是 0.29—0.36 eV/atom,详见图 2.18【A35】。实话说,笔者认 为这个结果比较勉强,只能供参考。

他们原计划测量出氢氘的区别,因为 HH 反应截面比 DD 反应截面低很多,但实际差别 不大。作者设想 DD 反应产物是 ⁴He,每个 D 放出 12 MeV;而 ppe 反应产物是 D,每个质 子放出 0.8 MeV (这还不考虑中微子带走绝大多数能量)。如果两者热功率一致,意味着氢 反应率是氘的 15 倍。当然,作者说这需要用气体质谱量测量 ⁴He,³He 等产物来确定反应机 理。而下一步计划是测量 X 和γ来确定是否存在 511 keV 的特征谱【A35】。我们用 Pt-D₂O 和 Pt-H₂O 电解都发现数量相近的超热,因次,笔者相信 H 和 D 具有相同的热功率对于机理探 索有指导意义。

Radiation spectrum : comparison with H_2 and D_2

ray-boo ε _{rad} σί	1y appi E ³ /(exp	roximati (E/kT)-1	ion work l):	s well.
; _{rad} and	T can b	t(κ)	mined p	recise
no H. D	0.121	1004.8	2.195	1
with D2	0.118	1033.2	2.395	1.091
with H2	0.117	1037.4	2.412	1.099

Radiations with H2 and D2 are obviously enhanced over the one without H2/D2. Similar radiant power for H2 and D2!

图 2.16: Cu/Ni 多层膜使用氢气, 氘气和真空三种情况下的热辐射光谱比较【A35】。

图 2.17: Cu/Ni 多层膜使用氢气, 氘气和真空三种情况下的超热结果比较【A35】。 Comparison for H2 and D2 gas: Temperature dependence of Qex

图 2.18: Cu/Ni 多层膜使用氢气和氘气时产生超热的活化能【A35】。

日本岩手大学的成田晋也(Shinya Narita)小组把以前山口原一与最近日本 Technova 公司的方法相结合,在10 mm×10 mm×0.1 mm的Pd 箔上用Ar离子束蚀刻而形成精细表面结构(见图 2.19),然后沉积100 nm厚Ni膜,在5 atm的H₂(D₂)气氛中加载到H(D)/Pd = 0.7,把样品放入真空腔内,抽真空到10⁻⁴Pa,在样品上通入0.75A电流刺激H/D扩散,连续检测样品温度(K型热电偶直接测温且红外温度计间接测温)和压力约24h。结果观察到热猝发(见图 2.20),最高超功率到1W,超热重复性好【A82】。该小组的结果与东北大学的结果类似,都把三维颗粒扩展到二维复合膜,有利于深入研究机理。

图 2.19:成田晋也小组的 Pd/Ni 样品制作方法(左)及设想的机理过程(右)。

图 2.20: 成田晋也小组在 Pd/Ni 样品脱 H (D) 时观测到的温度、电压和气压变化。

2.3. 康铜(Cu₅₅Ni₄₄Mn₁)丝

意大利的F. Celani报道了康铜丝-H₂(D₂)系统中的超热,用0.45 g样品,100—150 W直流 加热50—150 h可激活新康铜丝,该丝需要用低功函数材料修饰。还发现从最高功率开始的 冷却循环期间出现的超热与最高功率持续时间有关(这句话不太清楚,看起来很重要,录以 待考)。输入功率为130 W时,氢气条件下超热为5 W,氘气条件下超热为9 W。还发现超热 正比于丝上的电压降。他用超富空位态(SAV)解释结果【A16】。值得注意的是,Celani以 前说扭结的康铜丝容易出现超热,扭结容易导致材料中出现塑性应力,那这是否意味着内应 力与超热有关系呢?如果答案是肯定的,那么Pd-D系统中出现超热应该与相变导致的内应 力有关。但纳米Pd中的超热似乎不完全支持这个说法,因为纳米钯中吸脱氢很快,不容易形 成内应力。或者与Storms说的NAE有关。

加拿大湖首大学的 D. Alexandrov 复制了 Celani 的实验,康铜丝绕在氧化铝棒上, 氘气 纯度为 99.9998%,电加热康铜丝,用 RGA(残气分析仪)进行质谱测量。结果发现: (1) 康铜丝在初始温度 950°C 下进行了几个可重复实验,在导线与注入氘气相互作用开始后,导线发生瞬间爆炸性蒸发,观察到铜金属释放,释放的瞬时超功率大于 3.4 kW,功率密度 至少为 2.28 kW/g, COP=15,未测到辐射。(2)康铜丝初始温度在 660—690°C 范围内进行 了许多可重复实验,因为实验过程中样品未破坏,可重复使用。康铜丝温度在氘气注入约 8 秒后开始升高,并在约 25 秒达到 300—316°C 温升。超功率为 158 – 179 W,超功率密度为 105—119 W/g, COP=2.7,未测到辐射【A3】。

从上述两小组结果看,样品活化的关键是用大电流长时间加热,这与我们的经验有一致 性。

3. Pd-H(D)系统

长期研究 Pd-D 系统的 E. Storms 这次主要介绍他的唯象理论,他认为许多电子和氢核 聚集在核活性区(NAE)中的特定位置,形成不寻常的 NAS(核活性态/点,nuclear active state or site)。他设想 NAE 是物理间隙,既要足够窄以防止形成氢分子,还要比晶格距离大 以形成不同的物理环境。在问答环节他说间隙为 1 nm 太小,10 nm 太大,也许在 2 nm 左 右。形成的 NAS 可削弱库仑势垒,并允许氢原子核核力重叠并相互作用;这种相互作用涉 及合作共振过程;氢同位素聚变是主要核反应,周围核嬗变是次要反应;聚变能量通过高能 离子、电子和光子辐射以热量的形式耗散在周围材料中【A44】。

Storms 说荒田把纳米 Pd 密封在管中, Case 只有用椰壳木炭才可以产生超热(其他木炭的缝隙尺寸不合适), 高桥的 Pd-Ni-Zr-O 合金粉末,以及共沉积 Pd 的结果都是因为能形成间隙。即使是纯 Pd, 冶炼过程中残留的氧化物颗粒也有助于形成缝隙。Storms 有意通过把

各种高熔点氧化物颗粒熔入 Pd 中来增强 LENR。他说 Pd 吸 D 时膨胀产生的缝隙也是一种 NAE。他设想将来可在金属上加工成纳米槽来形成间隙,实现 LENR。前述成田晋也的 Pd/Ni 膜就是这样做的。

Storms 设想 NAS 是很多电子和氢核形成的聚集体,类似于 Shoulder 提出的 EV。一旦 形成就会发生核反应,产生的能量在粒子与光子间以复杂的方式分配。

他认为 Pd-D 中是 D+e+D 反应先形成 ⁴H, 然后再通过释放高速电子而形成 ⁴He。他之 所以认为存在 ⁴H 是因为在 ICCF14 上报告的氘气放电测到的粒子能谱中(见下图 3.1),发 现该粒子不是α粒子,因为用挡片后的行为不符合α粒子的特征,反而更像是质子的,所以认 为是 ⁴H。此外,相邻粒子能谱峰间距相同,是相同位置辐射出来的。同理,他认为 H+e+H 反应会形成 D, H+e+D 反应形成 T。Storms 说只含 H 体系中无 T,含 H 的体系会缓慢产生 T,H-D 混合体系马上产生 T。所以他认为电子参与了反应。笔者认为 ⁴H 的假设可能有问 题,因为释放电子就是贝塔衰变,这会产生中微子并带走主要能量,而这与 Pd-D 系统中超 热与 24 MeV/⁴He 的定量比值(即 DD 反应能已全部转化为热量,并未被中微子带走)相矛 盾。

图 3.1: Storms 2008 在氘气低压放电过程中测到的核产物能谱【A44】。

D.J. Nagel 综述了 Pd 中 H(D)电迁移与 LENR 关系, Celani 小组曾集中研究电迁移对超 热的影响,已经过世的 Preparata 在 ICCF6 报告了最显著的电迁移导致冷聚变的结果,他用 一根细长钯丝(直径 50 µm,长 250 cm)做阴极,在一例实验中,输入 87 W,输出 170 W, 体积功率密度达 50—100 kW/cm³。Nagel 建议在 H 或 D 堆积的电极末端进行元素分析,看 看是否有嬗变核产物【A81】。其实 Celani 小组到现在还用细丝进行冷聚变实验,就是电迁 移经验的延续。

3.1. Pd-D₂O 系统

美国的 M.H. Miles 回顾了早期测量 Pd-D₂O 电解系统中 ⁴He 的结果,当时他们用长颈瓶 收集气体后送到德州农工大学测量,结果只测到 ⁴He,完全没有 ³He。如果是空气中 ⁴He 渗 透进去的,实际渗透时间根本达不到观测水平。轻水电解系统中没有任何 ⁴He。迄今为止,已经有 15 个小组证实了 Pd-D 系统中主要核产物是 ⁴He 【A80】。

笔者用 Miles 的 Pd-B 电极(直径 4.71 mm,长 20 mm)终于重复出了明显超热,一例 对比结果如下图 3.2 所示,其中左图是去年初的结果,在误差范围内没有超热,右图是今年 初的结果,输入 3 W 时有 0.2 W 的明显超热,两图所用电极相同,电解池底部温度也相同, 但右图输入功率明显低于左图,也说明右图的实验产生了超热。此外,我们用预电解的方法 对电极进行预处理,结果 6 次电极预处理与 2,100 h 的电解热测量结果表明(见下表 3.1), 未处理的电极超热很小,前两次预处理可增加其后的超热,但反复预处理并不会增加超热, 说明每个样品的预处理次数是有限的【A99】。

图 3.2: (a) 实验#2021-0318,无超热,说明当时 Pd-B 阴极无活性;(b) 实验#2021-0228 产 生了稳定和持续的超热,表明 Pd-B 阴极具有了活性。

No.	R	P _{ex} /mW	I/A	t/h
0	1/7	21(7)	0.5-0.75	387
1	2/11	46(3)	0.17-0.7	436
2	11/12	130(2)	0.1-1.2	371
3	1/4	22(7)	0.1-0.6	86
4	6/13	43(7)	0.05-0.6	629
5	3/6	42(3)	0.1-0.7	130
6	0/2	6(2)	0.1-0.7	54

表 3.1: Pd-B 阴极预处理次数与超热产生的关系。

美国海军水面作战中心印第安黑德分部(NSWC IHD, U.S. Naval Surface Warfare Center, Indian Head Division) O. Barham 介绍了 HIVER(²H-Pd-Li Versatile-modeling & Evaluation of Results, "²H-Pd-Li 通用建模与结果评估"的简称)电化学能项目进展,该项目从 2019 年开

始沿用 Mosier-Boss 和 Szpak 小组的技术路线(参美国专利 8,419,919B1),用阴极共沉积法 形成 PdD_x,外加磁场,装置见下图 3.3;用 Seebeck 法量热,超热结果见下图 3.4;用 CR-39 测量辐射粒子,粒子径迹结果见图 3.5,粒子能量为 1—20 MeV;用 He-3 正比计数器测量中 子,结果见图 3.6;射频信号结果见图 3.7【A6,A58】。

图 3.3: HIVER 项目的共沉积实验装置【A6】。

图 3.4: HIVER 项目的热测量结果, 左图溶液中只有 LiCl 作为对照组, 右图中加入了重金属(应该指 Pd 和 Rh)。黄线是温度(约 25℃)。绿线是输入功, 黑线是 Seebeck 量热计所测的输出功, 可见超热约 5 W, 相对值为 30% 【A6】。

图 3.5: HIVER 项目的 CR-39 测量结果。(a) — (c) 是有粒子径迹的 CR-39 片,(d) 是粒子径迹相对稀少的 CR-39 片。粒子能量为 MeV 量级【A6, A58】。

图 3.6: HIVER 项目的中子测量结果,其中蓝色是本底测量时间,红色是实验时间,可见无明显中子计数【A6】。

图 3.7: HIVER 项目的射频信号测量结果,一般是实验开始 0.5—1 h 左右突然出现信号 【A6】。

2021年,为了验证 HIVER 项目的结果, DARPA 资助美国陆军工程兵团 (USACE, U.S. Army Corps of Engineers)工程师研发中心(ERDC, Engineer Research and Development Center)的寒区研究与工程实验室 (CRREL, Cold Regions Research and Engineering Laboratory)独立 重复 Pd 共沉积系统的冷聚变工作,实验平台已搭建好,用 Seebeck 法量热,用 Eljen EJ-200 塑料液闪探测器测量中子、质子、α粒子和β射线,目前尚无结果【A7】。

美国 P.A. Mosier-Boss 和 L.P. Forsley 讨论了以前 4 个小组(Bockris 1992, Szpak 1998, Miles 2004, Lee 2014)的 Pd-D 共沉积电解实验中的氚测量结果,有三大特点:(1)液相和 气相中的氚产生不是连续的,而是猝发式的(见下图 3.8),产率 3,000—7,000 atoms/s;(2) 低含氚(如 30 cpm)电解液中氚含量增加,高含氚(如 500—600 cpm)电解液中氚含量减 少(见下表 3.2);(3)固体 Pd 阴极实验中未观测到氚消失(电解导致氚富集)。作者结合其 他人的 CR-39 结果和可能消耗氚的传统核反应讨论后认为只有 DD 反应产生的 3 MeV 质子 继续发生 pt 反应可以解释实验结果,不太可能是 "H-"Li(有些实验未用含 Li 电解液)和 "H-"Pd 反应。虽然其解释可商権,但氚浓度变化的特点应该可为机理研究提供参考。【A14】

Tritium measurements obtained by Bockris et.al. [2, 3] in the liquid (L) and gas (G) phases for Pd/D codeposition experiments. Dashed lines are the expected amount of tritium based on the mass balance and isotopic separation factor

图 3.8: 1992 年 Bockris 小组在 Pd-D 共沉积实验中观测的氚含量变化。

表 3.2: 2014 年韩国 Lee 小组在 Pd-D 共沉积实验中观测的氚含量变化对初始值的依赖性, 也是高浓度降低,低浓度增加。

Electrolyte	0.3M PdCl ₂ , 0.1M LiCl, 100 mL D ₂ O (highly tritiated), 1.8 ml ammonia water	0.3M Pd(en)Cl ₂ , 0.1M LiCl, 100 mL D ₂ O (highly tritiated), 1.8 ml ammonia water	0.3M PdCl ₂ , 0.1M LiCl, 100 mL D ₂ O (low tritiated), 1.8 ml ammonia water	0.3M Pd(en)Cl ₂ , 0.1M LiCl, 100 mL D ₂ O (low tritiated), 1.8 ml ammonia water
Cathode/anode	Porous Ni/Pt gauze	Porous Ni/Pt gauze	Porous Ni/Pt gauze	Porous Ni/Pt gauze
Cathodic current profile	1-50 mA (4 h), 200 mA (7 h), 300 mA (1 h), 1 mA	1 -10mA (6 h), 50 mA (1 h), 100 mA (1.5 h), 150 mA (1 h), 200 mA (1h), 1 mA	20 -250mA (2 h), 20- 200 mA (0.5 h), 400 mA (0.5 h)	20-250 mA (2 h), 20-200 mA (0.5 h), 400 mA (0.5 h)
Electrolysis time	97 h	77 h	65 h	65 h
Tritium before	596.00 cpm	489.00 cpm	28.00 cpm	30.00 cpm
Tritium after	235.00 cpm	160.00 cpm	314.00 cpm	258.00 cpm

Lee et al.: Pd/D Co-deposition Tritium Results JCMNS 13 (2014) 294-298

美国 NASA 格伦研究中心(GRC)的 L. Forsley 等人讨论了 LENR 材料分析中元素的污染和输运对核嬗变结果的影响。1990—1993 年罗切斯特大学用田中贵金属公司的 Pd 片作阴极, D₂O+Li₂SO₄ 作电解液,他们用 EDS 比较了新样品与电解后的样品,结果见下表 3.3。他们认为虽然分析显示有新元素,但因为作为电解池的 Pyrex 玻璃中含有 4.0%B, 54.0%O, 2.8%Na, 1.1%Al, 37.7%Si和 0.3%K。而 Sn/Pb 焊料(比例接近 60:40)可能污染阴极,所以这些新元素不一定是嬗变产物。另一例是用 ICP-MS 分析含 Th/U 的质子导体,在< 0.2 A 工作 4h 后发现 Ba、Ni、Pb 和 Zn 大幅增加; Ca、Mg 和 Al 增加; Cr、Fe、Ni 和 Pt 微量产生; U 和 Th 减少。但 Mg、Ni、Cu、Zn、Ba 或 U 的同位素分布与天然值只差 1—2%,在误差范围内。【A25】他们的结论其实也是很多人对核嬗变结果疑虑的原因。

表 3.3: 罗切斯特大学所用 Pd 阴极在电解前后的表面组分变化。

Eleme	nt % Before	% After	
0	2.1	31.1	
С	4.4	22.3	
Sn	NA	16.0	
Pb	NA	10.3	
Si	0.1	8.0	
Pd	93.2	7.8	

3.2. Pd-H₂(D₂)系统

CRREL 重复了法国 Biberian 2021 (Proc. ICCF23) 和 Mastromatteo 2016 (JCMNS 19:173) 的激光照射 Pd-H 激发核嬗变的工作【A7】。使用 1g99.95%Pd 锭, 抽真空到约 44 mTorr, 充入 3 bar 氢气, 用红 (640 nm, 5 mW, 脉冲)、绿 (532 nm, 200 mW) 和 蓝 (405 nm, 20 mW) 三种颜色激光照射,光斑直径约 0.5 mm, 照射 9 天。实验结束 后,未从样品表面鉴别出绿光照射点,所以只报道红光和蓝光照射的结果,详见下图 3.9—3.11。用 CR-39 面对照射点观测到核径迹,这一点类似于 Biberian 的结果。

Mastromatteo 2016 用 633 nm, 0.9 mW 激光(面积 1 cm²)照射 250 nm 厚 Pd-H 膜(1.5 bar H₂)两周后表面产生 Na、Si、Al、Mg 和 Ca。而 Biberian 是用 650 nm, 5 mW 激光照射 350 nm 厚 Pd-H 膜(2 atm H₂) 3 个月,激光照射形成直径 0.2 mm 的黑点中心存在 N、O、Na、S、Mg、Fe 和 Ni。三者比较,所用激光波长接近,但 Biberian 的激光功率面密度最高,CRREL 的居中,Mastromatteo 的最低。就嬗变产物而言,如果把蓝光的结果也算上,三者都产生了 Na;而 Biberian 和 CRREL 都产生了 Mg 和 Ni;CRREL 和 Mastromatteo 都产生了 Si、Al 和 Ca;只有 Biberian 产生了 Fe。按照宇宙中元素的演化理论,铁是聚变的终点,Pd 吸收 H 裂变的最终产物只有到 Fe 才是放出能量最多的,看起来高激光功率密度有利于嬗变到最稳定的核产物。此外,Mastromatteo 发现 633 nm 的效应比 405 nm 的强,而此处是 640 和 405 nm 激光有效应,532 nm 的却无效应(至少是效应微弱),如能证实激光波长的影响,对机理研究有很大意义。

图 3.9: CRREL 红光照射后的核产物,主要是 Si 和 Ca, 然后是 Na、Al 和 Mo, 但没有蓝光 中产生的 Ni 【A7】。

图 3.10: CRREL 蓝色激光照射后不同位置的元素【A7】。

图 3.11: CRREL 蓝色激光照射后核产物与 Biberian 结果的比较,可见都产生了 Ni,其次相同的是 Na 和 Zn,此处还有 Fr 和 Mo。O 在对照组中也有,所以不算。但没有红光中产生的Si【A7】。该结果中的 Fr (钫)是放射性元素,原子序数是 87,如果真产生了 Fr,测量 β 射线谱可确定其同位素分布。

NASA GRC 的 T. Benyo 讨论了 Fralick 2020 年发表的,用 J-M 氢纯化器过滤氘气过程 中核产物的产生机理,该实验装置如下图 3.12 所示,用的是 Pd₇₅Ag₂₅ 管。实验前后用 ICP-AES 测量元素,发现产生了显著的 Cu 和 Zn (见下表 3.4)。用 EDS 也测到类似的新元素分 布。作者认为可以用高桥亮人提出的裂变机理——即氘与钯(或银)聚变形成不稳定核再发 生裂变——来解释,因为这些核符合 $Z^2/A > 17$ 的裂变条件,如 ¹⁰⁵Pd 的 $Z^2/A = 20.15$; ¹⁰⁷Ag 的 $Z^2/A = 20.16$ 【10】。

图 3.12: GRC 所用的庄信万丰公司的氢纯化器核心部件,上图是拆卸后的照片,下图是 X 射线透视照【Fralick et al, 2020, Int. J. Hydrogen Energy 45 (56) 32320, Fig. 2】。

Element	Pd25Ag	Results		Units
	Control/Unexposed	Exposed	Δ	
Ag	25.0 ± 0.1	24.9 ± 0.1	-0.1	wt%
Pđ	75.0 ± 0.1	75.1 ± 0.1	+0.1	wt%
Cr	Not detected	2 ± 1	+2	ppm
Cu	20 ± 10	140 ± 10	+120	ppm
Fe	20 ± 5	40 ± 5	+20	ppm
Mn	Not detected	0.5 ± 0.2	+0.5	ppm
Si	40 ± 10	30 ± 10	-10	ppm
Zn	Not detected	285±5	+285	ppm

表 3.4: 图 3.12 中 Pd-Ag 合金管在氘气循环后元素的 ICP-AES 测量结果。

Table 1. ICP-AES results of unexposed and exposed Pd25Ag.

A. Ziehm (G.H. Miley 博士后)介绍用 CR-39 测量 Pd-D₂ 放电过程中产生的α粒子。用 10 torr D₂,电压 550 V,电流密度 40 mA/cm² (等效于 5×10²¹ ions/cm² on Pd)。CR-39 上的 径迹尺寸、深度,100 和 500 nm Au 层阻挡等各种信息都表明 Pd 阴极发射的α粒子能量是 138 ± 21 keV,只有 d(d,γ)⁴He 反应产生的 80 keV α粒子最接近测量结果【无摘要】。这个结 果也很奇怪,因为现在认为 2D → ⁴He 反应产生的能量主要表现为热量,实验上从未测到 23.85 MeV 的γ射线,但现在测到了与 23.85 MeV 光子动量相同的α反冲核,那就意味着γ射 线也产生了,只是实验上看不到。

印度辨喜瑜伽大学(S-VYASA (Deemed-to-be) University)能源研究中心的 P. Ramarao 继续报道 Pd-H₂系统的超热【A87】。其装置结构见下图 3.13,这次使用三种独立方法验证超 热的存在。在相同输入功率时样品池表面温度高于参考池,不同输入功率不同模式下皆有超 热,结果还用数值模拟方法进行了分析。产生超热的条件是吸氢(氘)金属,Ni、Pt 和 Ti 都 有效,Pd 最好。摘要和墙报的细节都不多。

图 3.13: 印度辨喜瑜伽大学能源研究中心的实验装置【A87】。

此外,加拿大湖首大学的 D. Alexandrov 于 2021 年报道了可重复的冷聚变实验结果,用 氘产生了氦(包括 ³He 和 ⁴He)和能量。这些最终产物是氘与固体相互作用的结果,包括两 个样品:钼金属和钯纳米线。RGA 和光谱测量表明产生了 ³He 和 ⁴He。氦气浓度与样品室温 度间存在相关性。³He 和 ⁴He 的浓度都随着氘核动能增加以及样品室温度的增加而增加。未 测到中子和γ射线。用 Ga 和 Al 无结果。该实验的很多结论存疑,RGA 质量分辨率很低,如 无法分辨 D₂和 ⁴He,只能通过不同质量数的关联分布来确定不同质量数对应的原子种类。 所用气体是 95.5%的 N₂和 4.5%的 D₂混合气,反应釜内压力为 10⁻³—3 torr。样品吸满氘气 后反应就停止了【D. Alexandrov, Int. J. Energy Res. **45 (8)** 12234 (2021)】。根据网上搜索到的 另一篇摘要,他认为是 HD 反应生成 ³He, DD 反应生成 ⁴He。这个核产物与冷聚变已有的 模式冲突,一般而言,含氘系统很难测到 ³He。

4. Ni-H 系统

4.1. Ni-H₂O 系统

意大利的 F. Righes 等人用 5 L 的大电解池(见下图 4.1),电解池分成 8 个独立部分, 每部分体积都是 135 cm³, Ni 丝截面 0.3 mm²(需提前机械和化学处理),电解液是 NaHCO₃ 或 KOH 轻水溶液。使用研发了好几年的轻水脉冲电解技术,峰值功率 400 W,脉冲频率 100 kHz,脉冲高度 400 V,每通道平均功率 50 W,其中一例脉冲见下图 4.2。作者认为这种脉 冲可形成独特的电磁孤子,并形成相干态的电子团簇,进而引发核反应。作者说只有电脉冲 是不够的,具体还需要什么未说明。

In the picture below, an 8 independent sections device and its pulse generator are reported. In each cell Ni electrodes are present, previously subjected to both mechanical and chemical treatments.

图 4.1: 意大利 Righes 等人使用的电解池和脉冲电源。

图 4.2: 意大利 Righes 等人使用的电流脉冲,幅度为 400 V,脉宽 70 ns。

用液闪探头测量的光子谱见图 4.3,可见与氚β衰变的结果一致。用液氮冷却的锗探头靠 近电解池,结果未测到高能(>20 keV)γ射线,但在气体中测到两个峰值分别为 7.7 keV 和 16.5 keV 的 X 射线(作者意大利口音重,没听清代表哪种特征谱)。用 CHM-10 正比计数器 未测到高于本底 10%的中子计数。

EARLY EVIDENCES OF LOW ENERGY RADIATION

The first evidence of consistent Tritium production occurred in September 2020. A spectrometer (with a Scionix 38B57 scintillation detector probe) placed on the same desktop of the electrolytic cell showed an energy spectrum compatible with Tritium Beta decay.

Low energy photons over background values were detected also at the ceiling of the laboratory.

图 4.3: 左图是意大利 Righes 等人用液闪测到的光子谱, 谱图与氚β辐射形成的谱一致。本 底计数不超过 40, 实验计数达到 1400。有显著低能光子, 且在实验室天花板处也测到高于 本底的低能光子。

把电解液吸出,放在盒子中,用塑料薄膜盖上,结果打开薄膜后计数增加,说明逸出气中有氘(见图 4.4)。把电解液拿到其他实验室,测到 18—45 Bq/L 的氚和类似的β射线谱, 对照组无氚产生。

图 4.4: 揭开电解液盒子上的塑料膜厚 SBM-20 计数明显增加,说明有气相氚。

用盖革-米勒计数器测到的显著计数与电解过程同步,也说明是电解产生的辐射(见图

4.5)。

图 4.5: 意大利 Righes 等人把盖革-米勒计数器放在大电解池内,在脉冲电解过程中测到的 光子计数,与电解同步,可以确定不是电磁干扰。可见在活化阶段需要 45 W 的脉冲,启动 后 7 W 即可维持计数稳定。

此外还发现有死后热,即停止电解后温度长时间高于环境(见图 4.6)。作者倾向于用超密度氢 H(0)解释实验结果,认为是超密度氢发生了无中子聚变。电解液中未测到氘,氦和其他元素。实验重复率 100%。【A42】

HEAT AFTER DEATH?

Temperature graph (100 hours) after turning off the pulse generator (Cell placed outside lab).

图 4.6: 意大利 Righes 等人在实验结束后把电解池放在实验室外,结果 100 h 内虽然电解池 温度缓慢下降,但温度一直高于气温,可见出现了死后热。另一例是实验结束后,在实验室 内放置 17 h 也有类似缓慢下降的情况。

此处的工作完全用轻水产生氚,也是对 Storms 说法的佐证。当然具体的 T 产生机理需

要深入研究,肯定对冷聚变机理的破解具有参考价值——如果能证实的话。

4.2. Ni-H₂系统

法国 J.-P. Biberian 等人把粉末或薄片形式的金属放置在氧化铝或 Pyrex 管内,试管内塞入 K 型热电偶测温。试管内是真空或充入氢气。管外用电热丝缠绕加热,外面覆盖保温材料(见图 4.7)。试管与真空泵及气瓶相连。用电机驱动 72 个强磁铁在反应池形成 0.6 Tesla 磁场,频率 0.16—6 Hz(见图 4.8)。

Pyrex Tube with Heating Resistor

图 4.7: 缠绕加热丝和保温材料的 Pyrex 试管【A13】。

图 4.8: 用电机驱动磁铁形成交变磁场,试管放置在上下两面之间【A13】。

空白实验用空试管在真空或氢气氛下不同频率的磁场中进行。加热功率以 10 W 为单位 步进,变化功率后的 30-60 min 间测量温度。空白实验的温度随输入功率如下图 4.9 中黑 线所示,但在 Ni 样品放入后,在低于居里点 358°C时达到的温度低于空白结果,而高于居 里温度时达到的温度高于空白结果,如下图 4.9 中灰线所示。

图 4.9: 黑线是正常热功率-温度曲线,灰线是异常温度效应【A13】。

效应依赖于磁场频率,如图 4.10, 4.11 所示。此外镍颗粒尺寸越小,效果越明显。本结果无法用磁热效应解释(无磁场循环),远低于居里点温度时就有制冷效应。未来需要变化磁场和材料继续探索。他们在 7 年内做过 250 个实验,很多是失败的,目前也无法解释该结果【A13】。在提问环节, Storms 问驱动磁铁的电机是否会把能量传递给样品, Biberian 回答做过实验,变化转速对样品温度无影响。

图 4.10: 异常热随温度和交变磁场频率的关系【A13】。似乎随频率增加,温升向下偏移。

图 4.11: 室温时(指未加热)温差与磁场频率的关系,样品是氢化的小镍片【A13】。

布里渊公司 F. Tanzella 等人对布里渊反应器的即时伽马辐射测量来证实长生了伽马射线,反应器中放置 ¹¹⁵In,如果 Ni 活性层中产生了热中子,那么热中子与 ¹¹⁵In 反应会生成 ^{116m1}In 并放出伽马射线,只要测量伽马射线,就可以证实热中子产生,但 13 个实验未得到 正结果,伽马计数与本底一致,如图 4.12 所示【A92】。本文的热中子设想来自组内 Martin 等人的束缚诱导电子俘获 (Confinement Induced Electron Capture, CIEC)模型,即质子反复 吸收电子形成 ²H,³H,⁴H,最后放出电子形成 ⁴He【A78,无墙报】。

图 4.12: 布里渊公司的伽马测量零结果【A92】

5. 核嬗变,核产物

5.1. 印度理工学院坎普尔分校(IIT Kanpur)的电解核嬗变

印度理工学院坎普尔分校(IIT Kanpur)K.P. Kajeev 组继续轻水电解核产物测量工作。 在去年的 ICCF23 上,他们报道了 Ni、Cu、Ni-Fe 和 Kanthal 阴极在水中电解后都测到 Cu、 Mg 和 Fe 等产物,这些元素分布在距表面 200 nm 深度,TOF-SIMS 测量还表明产生的铜同 位素与天然分布不同,合金比纯金属更易发生嬗变。本次会议上有 3 篇报告介绍相关内容。

M. Kumawat 等的工作中阴极换成了黄铜(Cu_{0.52}Zn_{0.23}O_{0.05}C_{0.20})、青铜 (Cu_{0.66}Sn_{0.14}O_{0.10}C_{0.10})、焊丝(Pb_{0.46}Sn_{0.27}As_{0.07}S_{0.01}O_{0.05}C_{0.14})和银钎焊合金 (Ag_{0.75}Cd_{0.05}Cu_{0.10}O_{0.05}C_{0.05}),阳极还是石墨(99.9%,可避免对阴极的污染),电解液是1M K₂CO₃水溶液,电解参数为:~30V,2~3A,10~15h。EDS测量表明黄铜和青铜上都有 显著的Fe产生,Cu含量减少,Zn含量增加或产生新的(分别见下图 5.1 和 5.2)。在青铜电极上,Sn比Cu减少更显著。

EDS of Brass cathode (33 Volts, 5A/cm² for 10 hrs); Fe

图 5.1: 黄铜(Cu_{0.52}Zn_{0.23}O_{0.05}C_{0.20}) 阴极电解前后表面组分变化的 EDS 结果。 EDS of Bronze cathode (33 Volts, 5A/cm² for 10 hrs); Fe, Zn

图 5.2: 青铜(Cu_{0.66}Sn_{0.14}O_{0.10}Co_{0.10})阴极电解前后表面组分变化的 EDS 结果。

焊丝阴极上产生的是 Cu (见下图 5.3);银钎焊合金阴极上产生的是 Fe, Zn 显著增加 (见下图 5.4)【A38】。该结果与 ICCF23 上的可两相对照,类似的就是核产物集中于 Fe, Cu 和 Zn 这三种金属,如果 Fe 是反应物,那么产物有 Cu;如果 Cu 是反应物,那么产物有 Fe。从核结合能的角度而言,Fe 和 Ni 是单位核子结合能最高的金属,核产物集中在这些金 属附近肯定对核反应机理有指示作用。

EDS of Solder wire cathode (30 Volts, 4.7A/cm² for 10 hrs); Cu

图 5.3: 焊丝(Pb_{0.46}Sn_{0.27}As_{0.07}S_{0.01}O_{0.05}C_{0.14}) 阴极电解前后表面组分变化的 EDS 结果。

EDS of Silver brazing cathode (30 V, 5.0A/cm² for 9 hrs); Fe

图 5.4: 银钎焊合金(Ag0.75Cd0.05Cu0.10O0.05C0.05) 阴极电解前后表面组分变化的 EDS 结果。

热重分析(TGA)测量表明电解未产生稳定的超级氢化物(super hydride,指 H/M 大于 传统热力学比值,见下图 5.5)。他们还用 20 keV 的电子束轰击 Mg2NiH0.3,然后用 XRD 测 量结构,企图发现嬗变,结果无嬗变迹象。笔者认为这个结果是正常的,一是时间太短,二 是即使有也局限在窄小区域,XRD 没法像 EDS 一样可以先用 SEM 观察表面发现异常位点 然后再测量元素,所以不容易测到异常。

A. Kumar 等使用 ICCF23 上报道过的 Kanthal 合金(Fe74%、Cr21%和 Al 5%)阴极,石墨 阳极和轻水电解质组成的电解系统,在去年 30 V、3.5A 电解 1 hr 产生 Cu (20—53%)和 Mg (6—11%)产物基础上,本次用 Nal 测γ辐射,盖革管和塑料径迹探测器测量电离辐射。结果如下图 5.6 所示,虽然电解后测到嬗变核产物,但两个碘化钠探头未测到显著的光子信号 【A74】。

Fe 80 Cr 15.1 Al 4.9 Fe 76.4 C 11.8 Cu 5.4 O 3.4 Al 1.2 K 1.1 Pb 0.4 Si 0.3 Ca) EDS of Pur and transmuter cathode	94.3 2.3 1.1 0.4 0.0 0.0 e d (d)	(b) Lea Oute) Photon vs	RESULT de ce e er view transmuta	tion (below	e)	Trolytic Setup ide lead cave)
Electrolysis	0	N	0	FF	Significant	Transmutations
Parameter	D1	D2	D1	D2	Photons	Transmutations
FeCrAl, 27 V, 10 hr, 2.23 A/cm ^{2,}	13±0.7	11±0.8	12.5±0.6	12.1±0.9	NO	Cu5.4%
FeCrAl, 34 V,10hr 3.44 A/cm ²	11.8±0.7	7.7±0.7	10.7±0.7	8.3±0.6	NO	Cu6.4%
Ni, 30 V,3 hr 1.56 A/cm ²	863.2+/-9	364.9±4.1	888±11.8	363.5±5	NO	Au 2.3% Cu 1.6%
Ni, 30 V,3 hr 1.56 A/am ²	871±12.6	344±6.7	877±11.2	355±5.2	NO	Cu 1.7%(4)

图 5.6: 印度 IIT Kanpur 组的光子与核产物关联测量,结果未测到显著光子信号【A74】。

S.S. Lakesar 等报告用半波整流器电解轻水,测量嬗变核产物。电解装置如图 5.7 所示, Ni_{99.5}Fe_{0.5} 阴极上部外套塑料,两个电极裸露在水中长度为 1 cm,电极间距 1 cm,每次电解 120 min。电解结束后洗净电极,用 EDS 分析表面 50 µm × 50 µm 区域。嬗变在 1.4—45 V 皆可发生,无电压下限。在电极柱体上 Cu 是主要产物(见下图 5.8),虽然测到 Fe,因电极 原来就有 0.5%的 Fe,所以不能排除是偏析的结果;在顶部 Au 是主要产物(见下图 5.9)。 【无摘要】

> Plastic Insulation

Cathode

Experimental setup

- 1. Variac transformer
- 2. Half-wave rectifier
- 3. Graphite anode
- 4. Nickel cathode
- 5. 300 ml of 1M K₂CO₃ aqueous solution(aq)

图 5.8: Lakesar 等在阴极柱体上不同电压电解时测到的元素分布,主要是 Cu。

图 5.9: Lakesar 等在阴极尖端不同电压电解时测到的元素分布,主要是 Au。

5.2. 其他体系的核异常

美国独立学者 Sungho Jo (应是赵姓韩裔)试验了一个新方法,他设想电解轻水的冷聚 变反应要放出热中子,利用热中子与碳化硼 (B4C)中的 ¹⁰B 反应 (¹⁰B+n→⁴He+⁷Li+2.79 MeV)放出热量,装置如下图 5.10 所示,电解池阳极是石墨棒,电解液是轻水溶液,底部 是阴极。如果电解池底下的碳化硼温升异常,那就意味着反应确实放出了中子。

图 5.10: Sungho Jo 轻水电解测量热中子的方法【A69】。

结果如图 5.11 所示,可见当用电解液 B 和阴极材料 S 时底部温升异常升高。把碳化硼 紧贴电解池底部,结果二者温度未相互接近到平均值,而是都升高了,见下图 5.12【A69】。 ¹⁰B 的同位素天然丰度达 19.8%,热中子反应截面达 3,837 b。如果该结果确实,应该可用其 他方法测到热中子(如活化 ⁵⁸Fe 和 ¹⁹⁷Au 后产生短寿命β放射性,测量β强度随时间变化,如 果半衰期与文献值一致即可断定产生了中子)。如果热中子能证实,也会对反应机理指明了 方向。但布里渊公司并未测到中子【A92】,所以这两组的结果是相互矛盾的——如果不同体 系有相同机理的话。

图 5.11: Sungho Jo 用不同的阴极-电解液组合得到的碳化硼温升与阴极温升的比值【A69】。

图 5.12: Sungho Jo 实验中产生异常温升时把碳化硼紧贴阴极后出现的温度变化【A69】。

俄罗斯乌拉尔联邦大学的 M. Kashchenko(卡先科)等人认为冷聚变中氢核与电子形成 了准中子,然后与其他元素发生聚变: $_{ZX^4}+(p+e) \rightarrow_{Z+1}X^{4+1}+e$ 反应。他们的实验是用 Al 阳 极,W 阴极在含水蒸汽的空气中电弧放电,然后在阳极表面检测到硅粉末,高分辨质谱分析 表明, ²⁸Si 的峰值是化合物 ²⁷AlH 峰值高度的 2.5 倍(见下图 5.13),说明确实形成了新元素 【A71】。从引用文献看,Kashchenko 从事冷聚变也十多年了,最近出版了一本俄语冷聚变 专著,书名是 Low-temperature nuclear fusion: an introduction to the problem and its conceptual solution。

图 5.13: Kashchenko 在铝阳极放电后表面测到的 ²⁸Si 【A71】。

俄罗斯莫斯科动力工程大学的 A. Klimov 等人设计、制造和测试了水涡流等离子体反应 器(WPVR)。在该装置中,水涡流同时用作燃料(通过放电产生氢原子和离子)和热交换 工质。在 WPVR 中的氩涡流核心内产生脉冲重复放电。在该反应器中使用镍(和其他金属) 制成的电极。结果表明,WPVR存在一个最佳的稳定运行模式,COP 值高达 3—4,超热为 2—3 kW。在这种稳定的操作模式下,可实现电流和电压的自维持振荡。通过 EDS、光谱和 软 X 射线谱对这些沉积物颗粒进行了化学分析。水沉积物中含有许多新元素,如轻元素(C、 Al、Si、S 等)和重元素(如 Cu、Zn、Fe 等)【A36】。本工作中的嬗变核产物与其他系统的 结果是一致的。

6. 束靶反应

波兰什切青(Szczecin)大学(USZ)的K.Czerski(切尔斯克)小组致力于研究固体中低能核反应截面异常。Czerski等认为DD反应生成产物是⁴He 复合核阈值共振(threshold resonance)的结果,其共振宽度低于1 eV,因为宽度太窄,所以以前实验未观测到,室温附近的固体中主要以⁴He 反应道为主。该模型预言会出现 511 keV 的电子-正电子湮灭特征 γ谱(见下图 6.1 和 6.2), 16 MeV 的 D 和 8 MeV 的α粒子【A19】。

图 6.1: Czerski 提出的 DD 反应机理,无γ辐射,代之以电子-正电子对产生,右下角是相应的辐射谱【A21】。

Electron-positron energy spectrum

图 6.2: Czerski 提出的 DD 反应产生的电子-正电子辐射谱【A21】。

USZ 的 R. Dubey (Czerski 的博士生)报告了用硅探测器测量 ZrD₂ 靶中 DD 反应的低 能电子发射结果,摘要说证实了阈值共振的猜想,但其实验结果并无确凿的,与图 6.2 理论 结果可比拟的电子能谱和特征γ谱【A21】。

USZ 的 A. Kowalska 等报道 D 束辐照下 Zr 靶的 XRD 和 PAS(正电子湮灭谱)测量结果,前者主要揭示吸氢后晶格参数变化,后者主要测量空位、双空位、空位簇和位错的产生。 PAS 可检测到 10 mm 深度内 0.1—3 nm 尺寸的缺陷,浓度低到 10⁻⁷。主要结论如下: 氘束可 产生大量空位;碳污染不改变空位数,但氧会减少空位数;在辐照过程中空位可能向表面移 动; XRD 显示形成了δ相锆氢化物(ZrH_{1.5-1.6});核实验中观测到的高氘浓度可能起因于空位 束缚氘【A37】。

USZ 的 N. Targosz-Sleczka 等报道了用加速器研究 Zr 和 Ni 基合金中的轻核 LENR,认为晶格缺陷可以改变电子能带结构,导致有效质量增加,增强屏蔽。ZrD_x中 DD 反应屏蔽 能约 100 eV,NiBeD_x中约 450 eV,NiLiD_x中约 300 eV。他们提出定量表征屏蔽强度的数 学方法,见下图 6.3【A47】。

图 6.3: USZ 小组提出一种比较不同材料中屏蔽能的定量方法,比较不同能量 E_1 和 E_2 (如 一个 20 keV,一个 8 keV)时 Gamow 因子比值,并与无屏蔽能比值相比较。【A47】

USZ 的 M. Kaczmarski 等介绍了低能离子加速器的最新进展,安装了减速透镜可把离子能量降到低于1keV,同时保持最高达1mA的束流,靶温度从液氮到1,000℃可调【A70】。 2014 年他们就报道过该装置,可见也是个大工程。该小组提到一个有趣的结果是含 PdD_x 片中 D(¹⁹F, p)²⁰F 反应,硬 Pd 片中屏蔽能为18.2±3.3 keV,而软 Pd 片和 CD₂靶中无屏蔽能,见图 6.4,说明晶格中应力或缺陷对核反应确实有影响。

图 6.4: Pd 片中 D(19F, p)20F 反应截面增强【A. Cvetinovic et al, Phys. Lett. B (submitted)】。

美国的 S. Forbes (Hagelstein 小组)介绍了 MIT 束靶实验进展。他们的初始目的是重复 Lipinski 用≤ 400 eV 的 H 离子轰击 Li 生成 8.5 MeV α的反应。Lipinski 报道α是猝发式的, 猝发时间 90+s, 20 多个探测器中只有一个观测到该效应。但 MIT 用类似装置未测到明显的 带电粒子信号。此后他们用下图 6.5 所示 Ti 片进行束靶激发实验,先用 50 μ A, 500—1,000 eV 的 Ar 离子清洗表面两小时左右;再用 50—250 μ A, 500—1,000 eV 的 D 束 2—24 h 注入 Ti 形成 TiD_x;第三步用 Ar 束至少要 1—4 mA 激发 THz 振动;一般 Ar 激发后马上可观测到 效应,测到 10 MeV 粒子,有时几小时后出现,有时无结果,见下图 6.5 和 6.6 【A23】。

图 6.5: MIT 的 Ar 粒子激发 TiDx 实验——装置。

图 6.6: MIT 的 Ar 粒子激发 TiD_x 实验——用 0.05 mA, 950 V 充氘 20 h。1.5 mA 的 Ar 离子 激发 10 min。图中 5.4 MeV 是 Am-241 源标定能量值。

图 6.7: MIT 的 Ar 粒子激发 TiD_x 实验——上图 6.6 中 Ar 离子激发停止 12 h 后测到的粒子。

7. 其他系统

台湾大学的黄秉钧小组继续报道 ICCF22 和 ICCF23 介绍过的蒸汽压缩空化产生超热的 结果(见下图 7.1),这次 COP 从 ICCF23 的 1.9 增加到 2.39—2.55,观测到蒸汽压缩机(VCS) 中> 740 bar 和双管换热器(DHX)中> 225 bar 的压力异常,除了引起铜管变形和破裂外,还在破裂的铜管上测到 3—4 倍的 C 含量升高,10 倍的 O 含量升高,1.4—4.4 倍的 Fe 含量 升高。实验证实超热来自两相流热交换系统中的超声空化【A67】。

图 7.1: 黄秉钧小组的超声空化装置(下)及 COP 随蒸汽流速的变化(上)。

美国的 R.S. Stringham 这次总结了空化频率在产生超热方面的影响,他最早在 Pd 箔-D₂O 中使用 20 kHz, Pd 表面出现深蓝色和紫色。后来尝试了 20、46、1,600、2,000 kHz,结 果相似。如在 Pd 表面作用 20 kHz,400 W(下图 7.2 左)与 Ni 表面作用 1,600 kHz,40 W (下图 7.2 右)形成的微球颗粒类似。而且超声处理后收集气体只测到⁴He,未测到³He【A88】。

图 7.2: Stringham 不同频率超声处理过的不同样品都产生了类似尺寸的金属颗粒【A88】。

希腊的雅典国家技术大学 C.D. Papageorgiou 发现当导线中通过大电流时引起断裂,基于他讲授多年的麦克斯韦理论,最后得出结论是短时间内导线中心自由电子集中而剪切导线,高浓度电子的电场引起的斯塔克效应(即电场引起的原子能级分裂)削弱了库仑势垒,

使质子容易转化为中子,从而产生核嬗变。他们使用低强度脉冲,避免断线,但足够产生冷聚变。他的公司 PAP-LENR (PAP 应该取自姓的前三个字母)设计了下图 7.3 所示的产能装置【A84】。从构型看,他的技术路线类似于热聚变的 Z 箍缩 (Z-Pinch)技术。

图 7.3:希腊 Papageorgiou 的实验装置示意图【A84】。

丹麦的 K.C. Engvild 提出一种验证超密度氢的方法。自从瑞典的 Holmlid 提出超密度氢 以来,冰岛的 Olafsson,挪威的 Zeiner-Gundersen 等几个小组发表了 50 篇以上的文章,但一 直未得到学界认可。作者首先对能形成 DD 之间只有 2.3 pm 稳定间距有怀疑,再就是认为 实验设备(如飞行时间质谱仪)太昂贵,他提出一种简便的方法,就是在顶端透明的杜瓦内 用 532 nm 激光照射 TiD 钯,用固体径迹探测器测量辐射【A59】。笔者也浏览过上述诸位的 文章,主要实验问题还是信号太弱,无法下确切结论。

法国 J.-P. Biberian 等人介绍利用电荷团簇作为真空电容器储能,与二维的平板电容储能不同,电荷团簇是很多电子形成团簇,在三维空间中存储电能,所以能量密度很高。这是已 去世的 K. Shoulder 提出的概念,当时叫 Electrum Validum,简称 EV,详参: https://freel.tech/charge-clusters/【A52】。

8. 仪器方法

8.1. 热测量

意大利的 E. Marano 报道制作了一个反应体积约 4 cm³ 的量热计, 仪器灵敏度为 130 mV/W, 时间常数约 10 min 【A77】。此外, 他还介绍了一个 256 通道, 24 位的数据采集系 统【A76】。

美国华盛顿大学的 C. Patil 和 D. J. Nagel 设计一个透明的等温外套量热计用于研 究电解过程的热功率,其结构如下图 8.1 所示,仪器常数约为 0.25 W/℃,最小检测 功率为 20 mW【A85】。实话说,笔者不建议在这种量热计上费太大功夫,主要是仪 器常数依赖于液面高度,计算过程太复杂,可靠的结果也无法简单解释给读者,除 非超热很大。

图 8.1: 华盛顿大学 Nagel 小组的测量 Pd 电解重水的透明电解池等温外套量热法。

美国的 M.H. Miles 介绍了下边界方法(Lower Bound Method)在等温外套量热法中的应用,其显著特点是可以测量电解开始几分钟内出现的超热【A79】。

泰国水野技术实验室的 D. Gruenberg 和水野忠彦讨论了量热方法对超热放大的影响。水 野小组以前用的是气流量热计(也称为孵化器式量热计),把反应釜放在箱体内,主要靠箱 体空气出入口温差与空气流量来计算箱体内的热功率,在高温时需要用箱体本身的散热来校 正。该量热计的问题是无法保证反应釜温度均匀,所以发展了烤箱式量热计,内部温度更高, 温度更均匀。他们用直径 7 cm,长 25 cm 的反应釜在 435℃时得到 45 W 的超热,593℃时 超热>200W(或 0.22 W/cm²)。超热与温度呈指数关系,超热正比于催化剂面积。计划最终 实现 1—10 W/cm²的超热,用多片催化剂联合实现在 700℃下 8—16 kW。电输出的家用热电 联供(CHP)装置(模型见下图 8.2)【A29】。笔者以前说过,重复水野实验不能用 McKubre 用过的水流或油流式量热计,正是气体的低热容保证其反应温度足够高,反应得以进行。现 在大家对温度影响已形成共识,量热方法对重复试验的影响也不言自明。但目前冷聚变的科 学问题尚未解决,工程化如果走到科学的前面,对科学发展的影响将是深远的。此外,不知 道水野为什么要把公司办在泰国,也许是为了降低成本。

图 8.2: 左图是水野实验室现在的装置,反应釜放在气流量热计中。右图是未来的烤箱式量 热计中的多片催化剂,最终用高温流体(如超临界 CO₂)换热。

东北大学的笠木治郎太(J. Kasagi)等人用测量辐射光谱的方法进行量热,用中红外(0.22—0.44 eV),近红外(0.5—1.13 eV)和可见到紫外(1.3—5 eV)三种谱仪确定辐射光 谱及总辐射热功率,装置示意于图 8.3【A35】。当然,这种量热方法只适用于以辐射散热为主的真空环境。

Radiant Calorimetry setup --- photon detection in wide range of energy

图 8.3: 东北大学的辐射量热法装置【A35】。

8.2. 核产物测量

NASAGRC 的 L.P. Forsley 等介绍了低通量中子测量中的问题【A61】,其中需要注意的 是宇宙背景的中子通量与太阳黑子变化反相关(见下图 8.4 左),中子能谱见下图 8.4 右,测 量中子能谱要注意该问题。

图 8.4: 左图是太阳黑子周期变化(上部)与中子通量(下部)的关系;右图是宇宙背景的中子能谱【A61】。

A. Ziehm 介绍用 CR-39 测量α粒子的方法,值得初学者参考。

俄罗斯独立学者 S.A. Tcvetkov 等人讨论用 TI1-14 氦检漏仪测量 H₂, D₂, ³He 和 T₂的可能性。从墙报内容看,是磁质谱仪,质量分辨率不高,主要靠各种分子的排列组合来分辨, 无法通过质量数差别直接分辨不同气体【A94】。

9. 各种理论模型

理论仍是五花八门,莫衷一是,只能大概分类,录以备考。在这些理论中,用各种经典 屏蔽方法虽然无法解释冷聚变,但至少结论是可靠的,也为理解冷聚变提供一些视角;从 Storms 发展的 NAE-NAS 理论路径看,似乎各种团簇理论会有一个胜出,但目前还是假说,与实验结果间有巨大的鸿沟。各种场增强效应也许应该与团簇理论结合起来才有出路。此外,前面介绍实验时提到的理论将不再提及。

9.1. 经典理论的应用或扩展

MFMP(Martin Fleischmann Memorial Project ,纪念马丁·弗莱希曼计划)的 R. W. Greenyer 和 P. W. Power 以前是重复其他人的结果并持续在线报道实验进展,这次介绍在线工具处理过去的数据,以推进未来研究。他们介绍了两个工具: http://fusfis.org/和 https://www.nanosoft.co.nz/,可直接查询得到双核交换反应,两体聚变和裂变(二分裂)的反应能。作者发现冷聚变中已经发生的反应都是放出能量最多的反应,而不是传统核物理中截面最大的反应【A63】。笔者完全相信这个结论。

美国的 J. Dodaro 介绍了用第一性原理研究晶格催化聚变(LCF)【无摘要】。

L. Forsley 报告了 NASA GRC 小组屏蔽效应的理论计算,与热聚变相比,冷聚变条件下 电子密度很高,所以屏蔽很重要。他们讨论了最简单的核势垒隧穿过程——⁷Be 通过内转换 过程衰变为 ⁷Li(半衰期为 53.12 d)——中电子壳层的影响。当把 ⁷Be 放入富勒烯中半衰期 缩短 0.8%,该变化可用 Quantum Espresso 软件的 DFT 计算来验证。DFT 计算出的自由空 间和富勒烯中的 ⁷Be 原子外层电子云如图 9.1 所示。在富勒烯中,Be 电子云体积收缩 0.1%, 这个收缩导致电子密度在原子核处提高 10 倍以上,半衰期相应减少 0.8%【A24】。

图 9.1: NASA GRC 用 DFT 计算的在不同条件下 Be 电子密度分布及对核电子密度的影响 【A24】。

美国科罗拉多山学院的 N.L. Bowen (女)继续研究核中夸克电磁作用对核相互作用的 影响【A15,A54(两篇摘要完全相同,应该是编辑错误)】,这是她系列论文的第三部分。 作者数值模拟了 ²H 到 ²⁰⁸Pb 等数百个原子核的基态,计算出的结合能与实验值相差几个百 分点,表明了电磁模型的正确性。在会议报告中,Bowen 用经典的散射方法计算 NAE 中的 DD 反应 ($d+d \rightarrow t+p$, $d+d \rightarrow ^{3}He+n$)及其次级反应 ($d+t \rightarrow ^{4}He+n 和 d+ ^{3}He \rightarrow ^{4}He$ +p),结论是在 D/Pd=10 的 NAE 中可发生 DD 聚变链式反应,不需要其他物理假设,只要 NAE 中 D 密度高就够了。这不仅可解释反应率,还可以解释产物结果。笔者以为这个解释 其实也有问题,虽然她说中子让吸收了,所以测不到,但高能中子的吸收截面没那么大,这 种机理总能产生可测量的高能核产物。

9.2. 团簇

G.H. Miley(由其博士后 E. Ziehm 代讲)继续其团簇型反应位点的研究,他们所说的团 簇如下图 9.2 所示。在近表面的空洞中形成高密度的 H(D)团簇。Pd 薄膜阴极化/阳极化循环 可形成位错环和团簇【A41】。笔者认为这个设想与 Storms 的 NAE 结合起来也许可以形成 冷聚变的唯象理论。

图 9.2: Miley 的团簇示意图。

巴西的 L.O. Freire 等的电荷团簇微反应器(Charge Cluster Micro Reactors)理论类似于 Shoulder 的等离子体团概念,该反应器有如下特征: (A) 0.1 到 100 微米的有效直径; (B) 有固有磁矩; (C) 可吸收高能 (MeV) 光子; (D) 发射低能(<150 keV)光子; (E) 在某些 固体材料(例如铝)中非常长寿(以天计); (F) 通过固体材料传播的能力; (G) 在电介质 上留下独特轨迹的能力; (H) 可启动核反应与核嬗变【A62】。

俄罗斯的 A. Nikita 等人提出微型球闪(miniature ball lightning)理论,该球闪是多电荷 团簇,中心是多个同电荷离子,壳是极化分子,这些球闪在胶片表面的螺旋形运动形成规则 的等间距径迹,从松本高明开始报道过好几起这样的径迹【A83】。俄罗斯的冷聚变会议与球 形闪电会议总是一起召开的,把冷聚变归因于球闪是他们的理论特色。

9.3. 重电子, 小氢原子, 中性粒子

美国圣地亚国家实验室(Sandia National Labs)退休的学者 A. Zuppero 提出电子有效质 量大于某个阈值后就可以催化核过程,他给出的电子有效质量是电子质量的10—35 倍【A49】。 各种重电子理论也是冷聚变理论中常见的类型。

国际凝聚态核科学学会的秘书 W. Collis 通过对 Bazhutov 和 Fisher 原有模型的发展和 突破,提出了奇异中性粒子(Exotic Neutral Particles)催化中子转移反应的模型,他宣称可 解释冷聚变中的分支比异常和无贯穿辐射等现象【A18】

俄罗斯的 A.E. Danghyan 考虑电子之间除电相互作用外还考虑磁相互作用,结果计算发 现磁偶极相互作用可相互吸引,使两电子形成束缚态,基态束缚能为 265 keV,轨道半径为 0.135 pm,总自旋 *s* = 1,磁量子数 *m* = 1 【A56】。看其文献,也是研究了好几年的结果。如 果该结论是对的,整个世界都要崩塌了。

美国的 C.H. Martin 和 R. Godes 提出一个质子俘获电子的模型,摘要很短,未见墙报,内容不详【A78】。

9.4. 各种耦合和增强效应

P. Hagelstein 继续其耦合理论,他有两篇理论摘要《加速核退激模型:Fe-57 中 14.4keV 跃迁的 Dicke 增强激发转移》【A30】和《HD/3He 和 D₂/4He 转换中的矩阵元》【A65】,报告题目是《能量交换建模、超热、嬗变和其他效应》

G.K. Hubler 像 Hagelstein 一样也关注与声子的作用,他认为超热是体效应而非面效应, H 占据 Pd 中的 T 位和空位都可提高其振动频率(指光学支),降低 Pd 频率(指声学支)。H 振动频率在 2—40 THz 范围内, M. Swartz 的拉曼数据推荐值约 4.3 THz。他认为 Pd 中产生 超热有 3 个条件:(1) D 在 T 位足够多(约 30%)和高的空位密度;(2)用共振方法激发声 子;(3)持续激发保证处于声子共振态。因为 H 在 Pd 中 O 位扩散时要从 O 位跳到 T 位再 跳到 O 位,即 T 位是过渡态,所以当 D/Pd ≤ 0.64 时可保证在扩散过程中有最多的 D 在 T 位 上,因此建议 D/Pd ≤ 0.64。此外,Pd 纳米结构尺寸小于 9 nm;Ni 纳米结构小于 14 nm 【A32】。

表 1: Hubler 认为 Pd (Ni) 中产生超热需要的条件。

	(c) 1.021	102		
Mate	rialc	for	ΔHF	
viate	riais	TOR	AH	1

	D	н	Bulk	Nano
Pd	х		х	х
NI	?	х		х

need for heat; helpful	Pd	Ni
D concentration	X	?
H concentration		X
Tetrahedral site occupancy	х	?
Vacancy defects	х	?
polycrystaline texture	х	x
Trigger		
Surface microtopology	х	
Discrete nanoparticles	х	
External trigger	х	
Elevated temperature	х	х

Factors to increase probability to obtain heat

美国独立学者 J.P. Guokas 提出模型,寻找在金属表面——甚至没有金属的低能低密度 等离子体中——实现 LENR 的方法【A64】。未见更具体内容。

9.5. 更激进的理论

乌克兰的 V.I. Vysotskii 继续其相关相干量子态(correlated-coherent quantum states, CCS) 模型,这次有趣的一点是他说 Rossi 在 Ni-H 超热实验中用于电加热的螺线管产生的磁场也 起了作用【A48】。此外,他们用同样的理论来解释日冕的异常高温和³He/⁴He 比值升高【A95】。 日冕的解释是太阳物理学难题之一,主要是磁流体动力学问题,主流解释是磁重联,今年已 有两篇文章在该方面有所突破(DOI: 10.1051/0004-6361/202140638; 10.1038/s41550-022-01624-z),随着观测技术的提高,这个谜题也许很快能得到解决。毕竟太阳的物理条件更像 热核聚变,与凝聚态核科学差别很大,不一定非得拿冷聚变来套。

此外, 意大利 INFN 的 S. Bartalucci 和乌克兰的 V.I. Vysotskii 等人用 CCS 模型, 解释 450 eV 质心能量下的 ⁷Li(p,α)⁴He 反应截面增强和 Lipinski 的 Li-H 聚变结果【A51】。

日本东北大学的福原干夫(Mikio Fukuhara,不在岩村康弘等人所在的电子光理学中心) 认为地球上比铁轻的 25 种元素不全是 45.6 亿年前就有的,而是地球内核反应的结果。如在 ≥2,510 K 高温和≥58 GPa 压力下的碳酸钙中会发生如下吸热反应:

 $2^{12}C + 2^{16}O + 4e^* + 4\nu_e \rightarrow 2^{14}N_2\uparrow + {}^{16}O_2\uparrow + {}^{1}H_2{}^{16}O\uparrow + 2n-10.58 \text{ MeV}$

【A26】。他最近出版了一本书 Earth Science and Deuterium Nuclear Reactions,总结了地球内核反应的理论。

哈萨克斯坦里海州立大学的 G. Tarassenko 继续研究其地质冷聚变,这次讨论 He 和 Ar 在液态铁和熔岩中的溶解度【A93】。只有摘要,没有正文。实话说,看不懂他想说什么。

乌克兰舍甫琴科大学的 V.I. Vysotskii 和 M.V. Vysotskyy 讨论了部分磁化电离气体(热等离子体)中重复闪烁 LENR 的自相似激励机制【A48】。

俄罗斯的 L. Boldyreva 认为自旋超流与 LENR 的辐射有类似性,所以 LENR 中有类似 物理过程 【A53】。

美国的 S. Casselman 提出在 Pd 吸 H 发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变过程中巨大的压缩力把 D 压缩为 ⁴He,他的一个证据是 F-P 在 1989 年以前的实验是成功的,原因是没钱买新样品,老样品经 过反复使用,晶格更容易规则化【A55】。根据笔者自己的经验,这就是拍脑袋的说法。

美国加州独立学者 D.S. Szumski 继续推广自己的 LANP(核过程最小作用)理论,即核反应不是沿着放出能量最多的路径,而是沿着能量变化最小的路径,他用自己的理论分析了 G.H. Miley 早期 Patterson 型实验的核产物与超热数据,自认为符合很好【A91】。这明显与 MFMP 的结果【A63】相矛盾。

俄罗斯航空发动机中央研究院的 M. Ivanov 这次提交的理论文章题目是《凝聚态和非凝 聚态物质的单一物理 I: 基本定律和常数》【A68】。

斯洛伐克的 A. Kovacs 介绍了他本年在世界科学出版社的新书 Unified Field Theory and Occam's Razor《统一场论与奥卡姆剃刀》【A73】。宣称该理论不仅发展了场论,还可以解释 超密度氢,岩村康弘等多个小组的实验结果。

10. 结论

总而言之,与6年前 ICCF20 时相比,这次会议的最明显感觉就是冷聚变研究不再是遍地开花,研究者们不再追求新奇的效应,而是集中于重复性相对高的实验体系,这几个体系的重复性和效应显著性也将很快逼近质变的临界点。笔者可以大胆地预言,在不超过5年的时间里冷聚变一定会实现科学突破,确立其科学的地位。