

見出し「最重要な方向へ」

概説 「核エネルギー獲得の研究に従事した、アカデミー正会員イーゴリ・ワシリエビッチ・クルチャトフ氏との出会いについての、原子力分野のある長老の思い出。」

著者 物理数学博士 コンズタンチン・ムーヒン（国立研究センター「クルチャトフ研究所」）

序文

ロシアの科学界は、2013年1月12日に、祖国の原子力計画指導者であり、ソ連邦科学アカデミー所属第2研究所（現在名は、国立研究センター「クルチャトフ研究所」）の設立者でもあった、アカデミー正会員イーゴリ・ワシリエビッチ・クルチャトフ氏の生誕100周年を祝った。原子力計画の実施の初期段階において、クルチャトフ氏と一緒に働いたことは、私の幸せであった。

第二次世界戦争における最大の激戦中、即ち、スターリングラード会戦中、国家防衛委員会は、ファシスト・ドイツの侵略により中断していた、核エネルギー獲得の研究を再開するという決定を、1942年9月22日に採択した。戦時中において、この決定は、とりもなおさず、原子爆弾製造のことを意味していた。国家の課題を成し遂げるために、1942年4月、モスクワ郊外に、ソ連邦科学アカデミー附属第2研究所が設立された。この研究所の所長に、物理数学博士であるクルチャトフ教授がなった。

彼を選出したのは偶然ではなかった。戦前まで、クルチャトフ教授は、レニングラード物理技術研究所において、同系統の研究室を十分な結果を出しながら指導をしていた。さらには、戦争の1年前に、ソ連邦科学アカデミー会長に、ウランを使用した計画の詳細について、報告もしていた。

イーゴリ・ワシリエビッチ・クルチャトフ



イーゴリ・ワシリエビッチ・クルチャトフ

（この2人は実の兄弟。共に物理学者となる。左が兄、右が弟。）

最初、第2研究所の定員は、アカデミー正会員で、レニングラード物理技術研究所所長であった、ヨッフエ氏の指名による、カザン市からの12名の科学者だけであった。彼らは、レニングラードから避難をして、カザン市で働いていた。しかし、直ぐに、国家防衛員解の特別指令により、クルチャトフ教授に、第2研究所の定員を100名まで増員することが許された。軍需工場も含んで、どの企業からも専門家を招聘し権利も与えられた。実戦配備している軍隊からさえも。1944年10月に、最初の100人の「召還者」の内の一人と、記憶を辿ろう。

本文

モスクワ大学と研究所

1941年に、私はモスクワ大学物理学部を修了した。学業優秀証書をもらい、大学院に進学するように勧められた。が、戦争が始まったことなので、第51航空機工場の設計局に入った。そこで、6月から11月まで技師として働き、飛行中に翼に発生するフラッターの解析を行った。10月には、工場は疎開をした。私は、母親が病気であったので、家族と共にモスクワに残ったので、無職となった。私はモスクワ大学物理学部にあった無線工場に勤め、前線で必要としている無線機の制作に関わった。私は子供の時から無線が趣味であったので、工場での製品の出荷と軍への引き渡しにおいて、指導的な技師の一人であった。

モスクワ大学の主要機関が疎開から戻った後、私は物理学部で働くことになった。私は授業と、国防人民委員会からの課題である、無線工場の時より複雑な装置の開発研究を兼務した。その後、この地位から、大学から私一人を、召喚した。多分、私の専門性以外に、私が極秘の研究に従事していた

ことが評価されたのであろう。

1944年10月のある日、私は第2研究所の幹部と一緒に、モスクワ都心から長い旅に出た。最初は、地下鉄で「ソーコル」駅まで。その後、路面電車でパクロフスキー・スツレシュネフ」停留所まで。最後に、私たちを待っていたマイクロバスで、無線研究所の3人の若い卒業生と共に、広大な原野の軍演習場まで乗って行った。そこはモスクワの外れであり、何棟かの低い建物が建っていた。

最も大きな建物（現在の中央館）は3階建てで、私たち4人をクルチャトフ氏が出迎え、彼の部屋に案内してくれた。そのときには、クルチャトフ氏はすでにアカデミー正会員であった。私たちは、この研究所の主任研究員たちと共に、いろいろと話し合った。彼らの部署に私たちは配属された。私は第5局に配属され、その局長はチモシユク氏であった。

最初の印象

私は非常に複雑な無線機の製作に従事した。例えば、カソード・オシログラフなど。研究所の設備は、モスクワ大学より遙かに劣悪であった。トレチャコフ氏はこの仕事に、非常に興味を持ってくれた；毎日の朝夕の巡回の時、トレチャコフ氏は私の所に立ち寄り、話し合い、無線技術の本をちょっと読み、若い同僚とのつきあいは極めて淡泊なものであった。トレチャコフ氏に、アカデミー正会員としての重責の痕跡など、私は何も感じなかった。歳差があまり離れていなかったからである。当時私は27歳、トレチャコフ氏は僅か42歳であった。

定期巡回の時、クルチャトフ氏は、突然私に依頼をした。クレムリンでの、彼の講演で、放射能の説明のために必要な小さな装置を作るようにとのことであった。ガイガー計数器、増幅器、機械式計数器からなる装置を製作した。放射線があると、かちかちと音を鳴らす装置である。クルチャトフ氏は十分に満足をしてくれた。彼に装置を提供することができたことは、私の喜びでもあった。

1945年の初めには、クルチャトフ氏はすでに、原子計画の基本的仕事に関する中間リストを書き上げ、関係各部署の指導者を指名した。例えば、最初の原子炉の製作は、彼を主任とした第1局に任せた。彼の最も信頼のける補助者としてパナシユクがいた。祖国最初のプルトニウムの獲得は、第3局が行うこととがなった；ウラン同位体分離には、キコインとアルチモビッチ；原子爆弾の構造開発と準備はハリトンとゼリドビッチ。私たちは第7局を支援した。その局長はフリオロフとダビデンコ。彼らには、天然ウラン-軽水のシステムにおける連鎖分裂反応の可能性を調べるのがゆだねられた。クルチャトフ氏はこの課題を「水における科学」と呼び名を付けた。

これらと関係して、1945年から、チモシユクは、私を中性子物理学分野に引き入れた。私にはこの分野は初めての分野であった。30年代には物理学部では、学生には核物理学は講義されていないのであった。私は大きな興味を持って、中性子密度の検出のための放射性インジケータの利用方法に取り組んだ。第7局への私たちの支援は、水と同じように中性子を減速するパラフィンの性質の研究であった。私たちは、パラフィンの穿孔という機械的な方法でパラフィンの改善を試みた。しかし、直ぐに、フリオロフと私たちは、提案されている変形方法では、問題は解決しないことを理解した。それで、その方法を、当分延期をすることにした。

研究所の同僚たちは、中央館で基本的な仕事に従事していた。ここでは、クルチャトフの指導の下で、彼によって組織された科学セミナーが行われた。セミナーでは、具体的な課題に関して指導的な専門家の報告、核物理学や高等電子工学の教養講座が行われた。アルチモビッチやコゾダエフが講義を担当した⁽¹⁾。

中央館では仕事だけが行われていたわけではない。そこには何人かの同僚と彼らの家族も住んでいた。これは都合がよかった：何せ、仕事場と家が並んでいるのであるから。ついでながら、私は研究所の近くへの通行証を得ることができた。そのうち、ある出来事が起こった。クルチャトフが私を慎重に問い詰めた「君は何故、そんなにも早く（夜10時！）、仕事から早退をするのか？」。私はクルチャトフに言い訳をした「1945年に結婚した後、モスクワ郊外の妻の所に引っ越しをしました。それで、片道通勤に1時間半もかかります」。直に、クルチャトフの指示により、私たちに、現在の文化研究所の地区にある木造家屋の2部屋を割り当てられた。私の仕事時間は大幅に増えることとなった。

脚注（1）中央館には大きなホールがなかったので、クルチャトフの全ての科学教養活動は、二階につながる大きかった階段の踊り場で行われた。当時そこにはまだ部屋は作られていなかった。



クルチャトフ兄弟夫婦：イーゴリ・ワシリエビッチとマリア・ドミトリエブナ、ボリス・ワシリエビッチとリュドミラ・ニキフォロビナ



散歩中の家族

放射性化学実験本部

原子問題の解決の初期段階において、クルチャトフは、ネプチューンとプルトニウムを得るために、放射性化学実験に巨大な役割を与えた。

1943年の夏に、すでにクルチャトフはカザン市から、自分の弟のボリスを招聘し、超ウラン元素であるネプチューンとプルトニウムを獲得しそれらの性質を研究することを課題として与えた。理論家の計算によれば、プルトニウム、より正確には原子量239の同位体元素は、ウラン235と同じように、熱中性子及び高速中性子の作用のもとで核分裂をする、ということであった。即ち、制御反応炉と原子爆弾の実現には価値のある核燃料であるということであった。

この重要な仕事の解決が、ボリスを引きつけたのは偶然ではなかった。ボリスは1935年に放射性科学分野ですばらしい仕事を成し遂げていたからである。その過程で、ホウ素の放射性異性体(2)を発見していた。

ボリスと彼の同僚の仕事について、リュドミラが私に語った。1945年の夏に、彼女は化学専門学校を修了し、秋に、ボリスのいた局に就職した。博学と手先の器用さのおかげで、リュドミラは、ボリスの実験の替え難い助手となった。(1942年、彼女は私と一緒に、モスクワ大学科学技術研究所で、職階の高い無線機器組み立て工として働いていた。)そして、直に彼らは結婚をした。ボリスは、研究所敷地内に、兄と一緒に住んでいたので、兄弟夫婦は1つの屋根の下に生活することとなった。そして、私はというとクルチャトフの人生の出来事に立ち会うこととなった(3)。

脚注(2) 原子核異性体—基底状態にある原子核の幾つかにある、比較的長寿命の励起状態にある原子核。

脚注(3) 私は、自分の妹のリュドミラと共にクルチャトフ家族とは長い間近所つきあいをした。1960年に、最初、イーゴリ・クルチャトフが他界した。クレムリンの赤の壁に葬られた彼に別れを告げた。遺骨の埋葬の時、政府からボロシロフが参加した。彼はマリナ・ドミトリエブナに近寄り、彼女に哀悼の意を表した。彼は同時に、参加できなかったフルシチョフからのお詫びも伝えた。マリ

ナ・ドミトリエブナは1969年に亡くなった。彼女の遺骨は、私たちがノボデビッチ墓地の壁に埋葬した。ボリス・ワシリエビッチは1972年に生涯を終えた。ボリスは、同じ墓地に、荘厳な儀式（儀仗態の参加の下で）のもとで葬られた。2004年には、リュドミラに、私たちは最後の別れを告げるようになった。彼女の遺骨は、彼女が夫のために設立に参加した祈念碑と並んでいる、彼女の夫、ボリス・ワシリエビッチの墓に埋葬した。

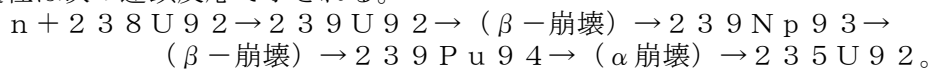
「地震学研究所」でのネプチューン

ピジェフスキー通りにあった、地震学研究所の、化学的工作には適していない地下室で行われた、ボリス・クルチャトフの最初の実験のアイデアは、次のような予想に支えられていた。アクチノイドに属しているネプチューンは、Ac89, Th90, Pa91, U92と類似の化学的特性を持っている。またネプチューンは、希土類元素La57, Ce58, Pr59,, を包含しているランタノイド群とも似ている。ウランとネプチューンの化学性質の類似性は、それらの分離の仕事を難しくした。が、アクチノイドとランタノイドの類似した性質（2つの群において、後に引き続く元素は、その前の元素の電子殻の中で、空いていた内殻電子を充填していく。）（訳者注 元素の電子配置標などを参考にすること。）は、ランタノイドのためにボリス・クルチャトフが開発した方法を、ネプチューン分離のために利用するという希望を抱かせた。

このアイデアを実現するために、約1週間にわたり、ウランを中性子で照射し、前述した方法でネプチューンを分離した。完全に成功した。ネプチューンの化学的性質は、ランタノイドの化学的性質に似ていることがわかった。最終的に、分離した標本は、2日～3日の半減期を持ち、β崩壊をすることで、ネプチューンが得られたことを確信した。1944年の春には、第2研究所の新しいところで仕事を完了することができた。得られた結果を基に、ボリス・クルチャトフは、硫酸ランタン方と呼ばれる、93の元素即ちネプチューンを純化する方法を開発した。この方法は簡単であり、かつ、期待が持てるものであった。

水の入った樽からプルトニウム。

1944年の夏に、中央館に並んで、プルトニウム獲得のための、ボリスの試みのために化学実験室が出現した。それは、輪と急階段の上に屋根を被せた酒蔵に似ていた。ここに、水の入った沢山の大きな樽が置かれた。その中には、ウラン塩約10kgの溶液の入ったフラスコが沈められた。中心には中性子源がおかれていた。線源からの高速中性子を熱中性子まで減速するために、水が必要であった。熱中性子はウラン原子と最も効率良く相互作用をするからである。プルトニウム239の蓄積過程は次の連鎖反応で示される。



中間生成物（ ${}^{239}\text{Np}93$ ）は2週間で飽和するまで蓄積する。しかし、非常に長い半減期を有しているものと予想されていた、多かれ少なかれある程度の量のプルトニウムを得るために、より長く、約3ヶ月間ほどの中性子照射が要求されていた。

1944年10月に、ウランの照射が完了したとき、プルトニウムの分離という、第二段階が開始した。半年の長きにわたった実験は成功裏に終わり、照射されたウランは、0.5kgから2.0kgも5つの分量に分けられ、若干異なった化学処理が行われた。ついに、1945年4月、最後のウラン2kgから、半減期が約31000年のα線放射性を持つ試料が分離された。これは非常に重要な達成であった：プルトニウムが実際に獲得できた、が、ごくごく僅かの量であった。α崩壊が観測できる程度の量だったのである。



ピジェフスカヤ通りの地震学研究所の建物。第3番ドーム。ここで、ソ連邦初めてのネプチューンが得られた。現在この建物に、科学アカデミー付属の大気物理学研究所が置かれておる。

「サイクロトロン」からのプルトニウム

その後、新しい成功がなった。ウラン照射を、第2研究所にある、小型のサイクロトロンで行うようになったのである。クルチャトフとネミョーノフの指導下で行われたサイクロトロンの始動は、原子計画実現における、初期の画期的成功のうちの一つとなった。当時、そのサイクロトロンはソ連邦で稼働しているただ一つの装置であった。このサイクロトロンは、前の中性子源の場合と比較すると、桁違いの中性子線を出してくれたのである。

装置の中で、パラフィンに閉じ込めた硝酸ウランの10個の大きな塊（5kgずつ）を照射した。各塊の照射は150時間に及んだ。これら全ての仕事は、1945年12月から1946年9月までに行われた。結果として、ボリス・クルチャトフはプルトニウム分離のすばらしい技術を確認しただけではなく、一介の化学助手でも簡単にプルトニウムの標本を手にすることができるようにした。分離したプルトニウムの量は0.018 μ gであった。プルトニウムの化学への利用のためには、もっと大きな質量が要求された。この課題を、ボリス・クルチャトフのグループは後になって解決した。原子炉の始動後である。原子炉製作の仕事は、第2研究所で順調に進んでいた。

黒鉛の純度を調べるためのニュートリノ実験

イーゴリ・クルチャトフが選択した核分裂連鎖炉の実現には、10トンのウランと、極めて純度の高い数百トンの黒鉛が必要とされた。その黒鉛の中には僅かな不純物も許されなかった。カドミウム、ホウ素などの不純物は中性子の吸収力が極めて高かったのである。これ故、ウラン-黒鉛炉の建設の第一段階として、黒鉛とウランの不純物含有度の検査をすること、と、不純物除去方法を開発することであった。

工場で生産している黒鉛の品質検査は1945年の春に始まった。この目的のため、中央館からあまり離れていないところに、大きな軍用ズックテントが設置された。通年にわたる仕事のことを考え、点との左隅には暖房用電気ヒーターが置かれた半地下室が掘られた。そこには2台の椅子と、測定器の置かれた机があり、机の上にはまた、イーゴリ・クルチャトフの部屋とつながっている内線電話が置かれていた。害のある不純物による材料の汚染の程度は、パナシクを主任とする化学者グループが判断をした。

テント内に、黒鉛の大きなブロックが組み立てられ、中心に中性子源がおかれた。放射能インジケータ方法（インジウム金属箔は中性子線が当たると、 β 崩壊をする。）や、気体のフッ化ホウ素（BF₄-中性検出器）が充填されているイオンチャンバー等を利用して、線源からの距離に対する熱中性子の密度分布を測定した。これらのデータの処理から、熱中性子の拡散距離Lを決めた。この値で黒鉛の純度を判断した。Lが大きければ大きいほど、材料の純度は高くなるからである。

工場からの黒鉛は、冶金加工のために電極の形で出荷されていた。その黒鉛には許容限度を100倍も上回る、不純物が含有されていた。工場労働者と一緒に、黒鉛の純度を上げる技術の開発に、半年が費やされた。1945年10月には、研究所に十分に純度の高い黒鉛が納入されるようになった。が、検査は継続された。より効率的な手段で：基準となる黒鉛ブロックの一部分が、検査対象の黒鉛の詰め物で置き換えられた。得られた拡散特性を比較した。中性子の計数値が低い詰め物は駄目と判断された。

選び抜かれた黒鉛ブロックは、1946年春に設営された2番目のテント内に、6m×6m×6mの巨大な立方体に組み立てられた。中心に中性子源がおかれ、全重量が365トンであった。テントの場所は、将来の原子炉のために建設された建物「K」の傍であった（Kはロシア語の釜の単語「КОТЁЛ」の筆頭文字である）。中性子の拡散長は48.5cm \pm 1cmであった（理想的な純粋黒鉛ではL=54cm）。反応炉の材料として、黒鉛の適正は十分であった。これらの仕事を、クルチャトフは1946年19月に完遂した。

(続く)



イーゴリ・ワシーリエビッチ・クルチャトフ。執務室で。1950年代半ば。

反応炉の臨界限度とウランブロックの純度の確定のための膨大な実験

1944年1月に、ポメラチェックは、膨大な実験の理論を立案した。しかし、その案を、クルチャトフとバナシュックに提出したのは、金属ウランが研究所の納入され始めた、2年後のこととなった。実験は2つの段階で行った。最初は、大きさ100cm×100cm×350cmの黒鉛ブロックで、熱中性子の拡散長を測定した ($L=48\text{cm}\pm 2\text{cm}$)。第二段階では、円柱の穴の空いたブロックが使われた。円柱の径をいろいろなもの歳、穴にウランを完全に充填(800kg)したり、半分充填(400kg)したり、あるいは、ウランの代わりに、ホウ素とパラフィンの混合物の入ったアルミ管が、中性子の吸収のために入れられた。いろいろな変種の装置で得られた拡散長のデータに従って、フルソフの補正をされた、無限に大きい反応炉のためのポメラチェックの理論は、増殖係数の大きさとして $k_{\infty}=1.09\pm 0.02$ を与えた。これに従えば、反応炉の臨界半径 $R_{臨海}$ (実際の大きさに対して増殖係数 $k=1$ を対応させて(? *))は本当に小さい値 $R_{臨海}=2.0\text{m}$ となった。

この見込みのある大きさ $k_{\infty}=1.09$ において、特別に純度の高いウラン800kgを使用する必要があることとなった。が、反応炉の建設には、数十トンのウランが必要とされた。このために、納入されるウランの質の検査という、極めて具体的な課題が残された。それをてきぱきと行うために、グラフィイトの質の検査に似た方法が利用された。***** (未理解)。その分量は有効であると見なされ、 k_{∞} に換算すると、 $1.0 < k_{\infty} < 1.09$ の領域の値を与えた。ウラン以外に、ウラン酸化物である UO_2 、 U_3O_8 についても調べた。

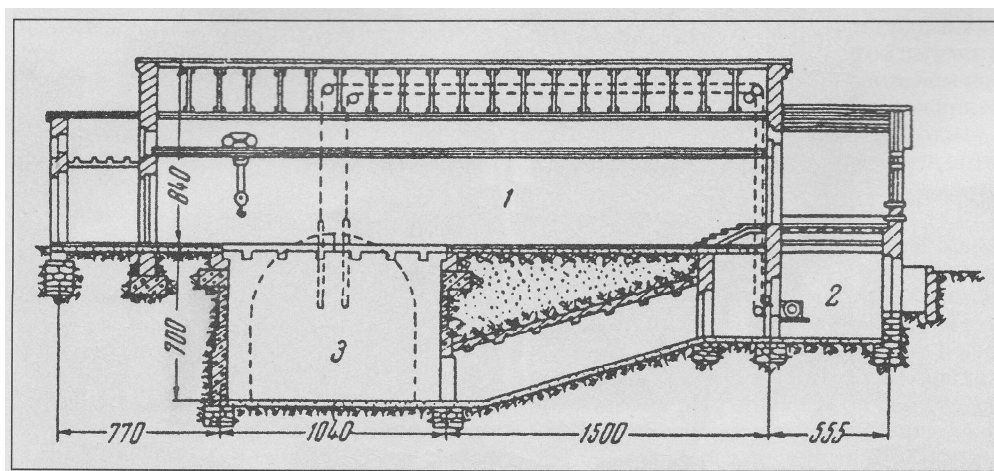
反応炉Φ-1の構造とその始動の特殊性

クルチャトフは、必要とされる品位のウランが、十分な量まで納品されるのを、待ちきれなかった。不合格品ではないウランと黒鉛を利用する、「Φ-1」と命名した最初の反応炉の建設を決定した。この炉では、 k_{∞} の評価は、1.04の値であった。炉の半径(中性子の黒鉛による反射を考慮すると厚さは0.8m)は4.5mに達した。全体として、休憩場をした装置の直径は、9m。その際、下の半球部分は、安定性のために円柱とする必要があった。反応炉の建設のためには、およそ50トンのウランと500トンの黒鉛が必要であると見積もられた。



ソ連邦最初のウラン-黒鉛原子炉Φ-1が設置されていた建物「組み立て修理」の現在の様子。

1946年6月にはすでに、大きさが15m×40m、高さが8.5mの建物「K」(4)が建設された。そこには、反応炉を納めるための、広さ10m×10m、深さ7mのコンクリート製炉床が作られていた。勤務員のための部屋は、同じく地下室に作られ、鉄筋コンクリートの壁と、厚さ15mの土嚢で放射線からの防御が計られていた。基礎穴へは、曲がりくねり傾斜したトンネルを通過してたどり着くことができた。放射線を通過させないためである。



建物図面 反応炉Φ-1の建物の断面図：1-メインホール；2-実験室；3-基礎穴。

基礎穴中での、反応炉の大きさの正確さを期するために、幾つかの大きさの臨界未満のモデルが建設され、モデルの中心で、自発分裂時の中性子密度を測定した。測定の結果、R臨界は3.8mまで短くすることができ、黒鉛の量は400トンまで減少させることができることがわかった。

反応炉の建設は、1946年12月15日から始まった。その時点では、研究所には、必要な金属ウランの内、半分と少ししかなかったのだが。このため、組み立ての時、その(?)酸化物を圧縮して作った練炭状のものさえ使用した。黒鉛ブロックは、10cm×10cm×60cmの直方体形状であったので、建設された装置はしっかりした構造をしていた。

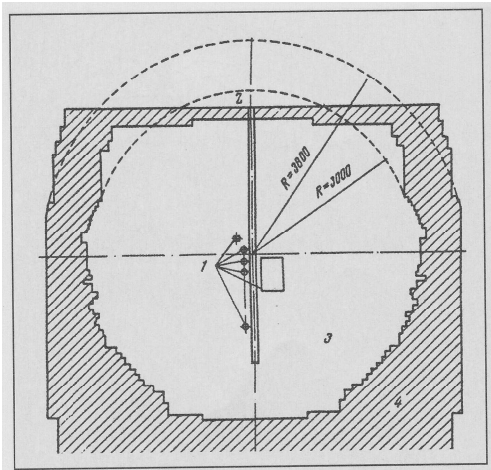
各10cmの層は黒鉛で密にできていた(8つの下の保護層と8つの上の保護層-中性子の反射層)り、一定の間隔に開けられたチャンネルを持った黒鉛ブロックでできていた。ウランブロックと練炭のために(活性ゾーンは60層)。良質のウラン塩は層の中心に充填された。質の劣るウラン塩は中心から遠ざけて。練炭は周辺に。そのような原則で、黒鉛を配置した。

反応炉の構造に、制御と防御のための棒(=制御棒)の3つの垂直のチャンネルを準備した。測定装置と小さい実験装置のために、5個の水平チャンネルを。炉の中心を通る断面積40cm×60cmの水平トンネルも準備された。ウラン-黒鉛の格子からできた14本の充填材がこのトンネルを埋めることになっていた。充填材を同じ大きさのもので交換することで、反応炉の中心も含んで、炉内の任意の所で、照射実験をすることができるようになっていた。

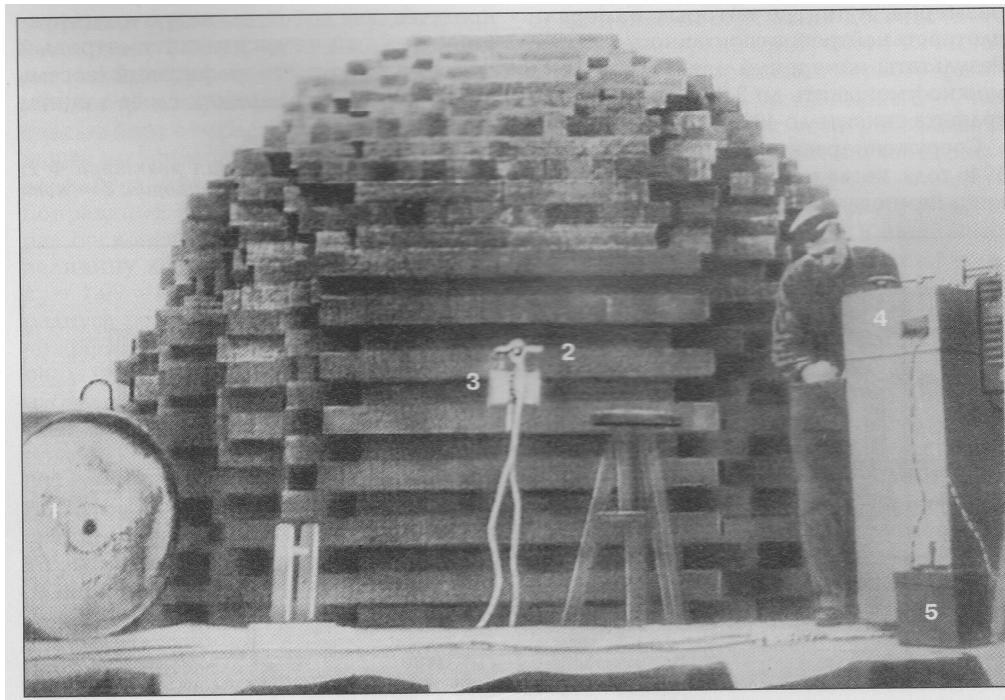
計画では、反応炉は68番目の層の積み込みで、臨界となるはずであった。しかし、自発分裂の中性子測定は、反応炉は早めに活動するであろうことを示していた。次のようになった：62番目の層を充填した後、制御棒を引き上げると、中性子数は、飽和に達することなく、止めどもなく増加し始めた。そして、制御棒を落とすことになった。予定していた68番目の層を入れることなく、反応炉は期限前に活動した。1946年12月25日のことである。12月28日には、クルチャトフと原子計画監督者ベリア、バンニコフ、ペルブヒン達は、実験反応炉Φ-1の始動に関して、スターリンに報告をした。我が国の学者は原子力を獲得する秘密を手にしたのであった。

2週間後の、1947年1月9日、クレムリンのスターリンの部屋で、会議が行われた。その会議で、原子エネルギー利用に関する科学研究の仕事の状況が審議された。その会議では、第2研究所から、クルチャトフ、キコイン、アルチモビッチ、ハリトンが発表をした。

脚注(4) これは直に「組み立て工房」と呼ばれるようになった。



反応炉図面 最初の核反応炉Φ-1の垂直断面図：1-実験用チャンネル；2-制御棒用チャンネル；3-活性ゾーン；4-黒煙ブロック製の反射材隔壁。



臨界未満モデルNo. 1：1-熱中性子の基準場を持った樽（？*）；2-出力段付きのBF3チャンネル；3-線形パルス加速器；4-制御盤；5-蓄電池。

反応炉Φ-1の動力学

私は反応炉の始動には立ち会っていなかった。が、この歴史的な出来事の後直ぐに、勤務員としての働くことになった。

研究所には、ウランブロックの納入が継続していた。それらブロックは、産業用反応炉の建設のために予定されていた。それはすでにクルチャトフとメルキンが1945年から計画していたものであった。納入されたブロックの試験は、「親」のブロックの幾つかを、試験ブロックに交換して、通常条件下で反応炉を始動し、反応炉の反応特性を比較する方法で、極めて便利な検査で行うことができた。ウランブロックの質の検査に関する「専門家」として、私をこの仕事をするように招聘した。

Φ-1の重要な特性は、増殖係数 k が小さいことであった。 $k=1.005$ 。平衡値 $k=1$ から、僅か0.5%高いだけであった。これに関して、反応炉における連鎖反応は、いわゆる減速中性子の参加があるときにだけ起こることができた。2次中性子のスペクトル中で、その割合は0.64%（0.5%以上、即ち、それ（？*）無しでは $k < 1$ 。）。減速中性子は、分裂の瞬間だけ飛び回るのではなく、ある時間飛び回るのので、減速中性子の作用下にある反応炉は、与えられた出力まで疾走し、スイッチを切った後、非常にゆっくりと減衰していく。通常のウインチで、センチメートル単位を目盛りの付いた、制御棒を上げたり下げたりして、私たちは手動でそれを制御した。制御棒の位置はペリスコープ（=潜望鏡）で観測した。後になって、1950年に、ペリスコープを、特別仕様の光学システムに取り替えた。ウインチは電動式となった。



ソ連邦科学アカデミー付属第2研究所の、最初のソ連のウラン-黒鉛型原子炉Φ-1の組み立て中。

勤務員のノルマとして、ブロックの質の検査以外に、反応炉を始動と、予定出力まで反応炉の加速、があった。反応度 $\rho = (k - 1) / k \approx k - 1$ の測定の目的もかねて。反応度は制御棒の差し込んだ深さに、線形的に依存しているの、反応炉の反応度については、ペリスコープで覗いた制御棒の目盛りを見て判断した。

これらの仕事は、大きな出力を反応炉に要求はしなかったの、勤務員には全く安全であった。もし、大きな出力が要求される時には、500m以上も離れている中央館から、遠隔制御で反応炉を始動した。アメリカの1号原子炉と違っているのは、Φ-1は空冷ができたことである。反応炉の始動は、同僚達が不在である、日曜日毎に行われた。これを私たちは隠語で「スバデバ (=結婚)」と呼んでいた。ついでながら、パナシクの黒鉛ブロックは「クチャ (=堆積)」と呼ばれ、ボリス・クルチャトフの地下化学実験室は「パグレフ (=穴蔵)」と呼ばれていた。この反応炉に、1947年秋一杯まで、私は勤務した。第5局での通常勤務による中断があったが。

プルトニウムの化学

1947年春に、第2研究所において、原子爆弾製造における重要な進展が見られた。ボリス・クルチャトフと、彼の同僚達は、原子炉Φ-1における、5kgのウラン酸化物2つの塊の照射の後、十分な量のプルトニウムを得た。1947年4月には、研究所は、「シンクロトロン製プルトニウムより、1300倍も多い、質量6.1μkgと17.3μkgの2つのプルトニウムの塊を持つに至った。それらは、プルトニウム化合物の化学特性、難溶性化合物（水酸化物、フッ化物、水和物、過酸化物、ヨウ化物）の溶解性、を研究するために使用した。

これらの課題の解決は、工業用原子炉で照射したウランから、kgオーダーで、プルトニウムを分離する化学手段を開発するために、必要であった、その工業用原子炉は、イーゴリ・クルチャトフの指揮下で、ウラル地方のチェリャビンスク-40（現在の企業合同「灯台」）に、すでに作られていた。その始動は、6月8日に行われた。*****。ウランは72.6tを必要とした。

ボリス・クルチャトフは、自分の方法を直接、「灯台」で確かめた。が、開発された技術の受理と導入に関する特別委員会は、彼の競争相手、アカデミー正会員フロピーン、をひいきした。フロピーン自身は、ボリスの硫酸ランタン方法を高く評価していたのであるが。

課題のパラメータである100MWを工業用原子炉は、1948年6月22日に達成し、新しい核燃料であるプルトニウムの生産の24時間稼働を開始した。クルチャトフは主目的、原子爆弾の製造に、大接近した。

アルザマス-16

閉鎖都市、アルザマス-16（ニジェゴロスカヤ地方のサロフ市）にあった、第2研究所の支所、

第11設計局で、原子爆弾の設計と準備が行われた。1947年末に、そこへの出張命令が私に出された。

この出張の前史はそのようなものであった。原子炉Φ-1で働いていたとき、第12局の上級研究者であるジシンと知り合いとなった。彼は第11設計局との共同計画に関係していた。彼は、設計局における長期の仕事のために、若い物理学者から人を選び出した。1947年の秋までに、彼は研究所の職員の中から2人を説得することに成功した。冬を前にして、原子爆弾を製作するというロマンで、彼は私を誘惑した。すでに、共同研究で通じた私の2人の知り合い、フリオロフトダビデンコが、設計局で働いていたことを、言うておこう。

アルザマス-16は、一般社会基盤、鉄道駅、修道院、空港、農機具工場、生き生きとした景色があると共に、長さ80kmにも渡る鉄条網で囲まれていた。町には、この地方の住民以外に、更に3つに分類される人たちが住んでいた：出張で来た第11設計局の研究者達、新しい研究所の建物を建設した囚人達、そして、もちろん、警備員達。

到着した次の日、第11設計局の主任設計士で、科学者達の指導者である、ソ連邦科学アカデミー正会員であるハリトンが、私たちを迎えてくれた。所長はゼルノフ将軍。ユーリ・ボリソビッチの代理人に、ソ連邦科学アカデミーの最も若い正会員である理論物理学者のゼリドビッチが任命されていた。2人が高い役職に就いていたのは道理であった：彼らは1939年にすでに、ウランの連鎖核分裂の理論を構築した。

私はハリトンに、放射線技術、中性子物理学についての仕事について、サイクロトロン、原子炉Φ-1について話をした。彼の質問に答えた。この会合の後、フリオロフの研究室に所属することになった。私が第2研究所でもらっていた額の2倍の給料をもらえる共同研究者として。

最初、私たち新人には、核物理学の講義が行われた。読むべき論文や本が推薦された。教育プログラムが終了した後、各人に、具体的な課題が与えられた。私には、ウラン分裂の中性子スペクトルの研究をすることが委任された。この時点では私はすでに、我が国や外国における原子力問題の状況について、ある程度理解はしていた。スミットの「軍事のための原子エネルギー」の本も読んでいた。差し迫っている、これらの仕事は重要であるが、難しいということを知っていた。天然ウラン（最小プログラム）の2次中性子だけではなく、高純度のその同位元素 ^{233}U 、 ^{235}U 、そして当然、プルトニウムの同位元素 ^{239}Pu （最大プログラム）のスペクトル測定を私がすることになった。

フリオロフとの定期会議の時、私は彼に、最大プログラムの将来の研究に関するナイーブな判断を打ち明けた。しかし、彼は、最初は、中性子スペクトル研究の適当な方法を選び出し、最小プログラムに集中するように助言を私にした。「これについて十分に考えるように。特に、私が、2週間後モスクワから戻ってきたとき、私に報告ができるようにしておいてくれ。」彼はそう言って、モスクワへ飛び去った。

私の頭の中では、目前の研究の、少し空想めいてはいたが、具体的な計画が描かれ始めていた。というのは、良好な中性子線束（このような中性子線束はサイクロトロンでも原子炉Φ-1でも得られていなかった）と、純粋なウランとプルトニウムを利用するものであった。純粋なものもまだ得られてはなかったのである。ともかく、フリオロフがモスクワから戻ってきたとき、私たちはこの課題について話し合い、次のように決定をした。私が光乳剤法を利用する。私は、原子炉の熱中性子（5）で照射される、光乾板上にプロトンを経由して記録される、天然ウランの分裂の中性子スペクトルの研究に着手する。

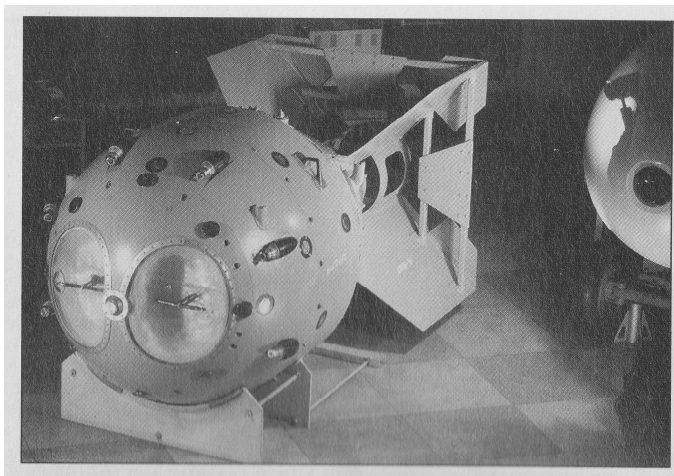
残念ながら、アルザマスで、この仕事をしたのであるが、旨くいかなかった。1948年の春に、私は短期間モスクワに出かけた。第2研究所で、私はグレビッチと会った。フリオロフから頼まれた中性子源を、グレビッチに渡すためである。が、ついでに、我々の問題を審議するためでもあった。私の話に注意深く耳を傾けて、グレビッチは、全く突然に、第11設計局に私が戻らないように提案をした。というのは、彼の所属している部局で、予定している計画の完遂に時間が残されていなかったからである。私の問題について、フリオロフは悪く受け取ることはないであろうと、グレビッチは答えた。法的な点について、ハリトンに電話をして調整するとも答えた。女房と相談をし、プラス・マイナスも考え、私はモスクワに残ることにした。結果として、原子爆弾の製作に参加するという、私の試みは駄目となった。が、グレビッチの部局で、長期にわたる、完全に上首尾の仕事が始まった。最小プログラムを、私は早めに、かつ十分に完遂した、ことを付け加えておく：1952年春に獲得した修士論文の基礎は、その（*）結果にある。

グレビッチの部局での5年間で、別の、極めて幅広い研究プログラムを完遂した。クルチャトフが「水の科学」と呼んだ課題である。1945年に、フリオロフ、ダビデンコ、そして、私とチモシユクが参加した課題である。1950年初めに、私はこの課題に戻った。当時、天然ウラン（同位元素 ^{235}U の含有率はたかだか0.7%）の代わりに、少し純度の高い天然ウラン（ ^{235}U の含有率が3%まで）を使用すると、普通の水を減速材とした原子炉を製作することが、全く可能である、ということが明らかになっていた。この結果、「水の科学」は極めて急を要するものとなった。特に、開始した*****軽水炉の計画過程において。

この仕事のサイクルは、1957年に完了したが、基礎的な結果は実験を耐え抜いた。1963年、私が博は論文に合格したとき、*****。

走行しているうちに、ウラルにおける工業用原子炉の始動から1年後、クルチャトフのグループは、

重要な課題を成し遂げた：祖国最初の原子爆弾を製造した。1949年8月29日、セミパラチンスクから西方へ約2170 km のところのプリールチシュカヤ草原にある、核実験場で、それは行われた。当時のソ連邦のカザフスタン共和国内である。実験が行われた翌日、8月30日、ベリヤとクルチャトフは、スターリンに手書きの報告書を、署名入りで送った：「スターリン同志へ。報告します。ソ連邦の科学者、設計士、技術者、我が国の工場の経営者と労働者、は4年にわたる厳しい労働の結果、ソ連邦の原子爆弾を製作するというあなたの課題を完遂しました・・・」(6)



最初の祖国の原子爆弾 P Д C - 1

著者は、この論文を書くに当たって、価値のある助言と多くの助力に関して、アレクセーフ、パポフ、ハリゼバの各氏に対して謝意を示す。

脚注(5) 熱中性子-減速材中の原子と熱平衡状態にある、運動エネルギー 0.025 eV を持つ遅速中性子。

脚注(6) この報告では、原子爆弾は包み隠さずそう呼ばれている。他の業務上の書類では、秘密保持のために、原子爆弾を、反動エンジンと呼称していた。最初の原子爆弾 (P Д C - 1) には、核燃料として ^{239}Pu が使用され、2番目の原子爆弾 (P Д C - 2) には ^{235}U が利用された。

経歴書

コンスタンチン・ニキフォロビッチ・ムーヒン、物理数学博士、教授、ソ連邦科学界での重鎮、は1918年モスクワに生まれる。国立中央研究所「クルチャトフ研究所」に、相談役、一般核物理学研究所の主任研究者として勤めている。

原子計画実現の仕事に参加した以外に、35年間にわたり、モスクワ技術物理研究所で教授を務め、核物理学全般の講義を担当した。この講義を基礎に、大学生のための教科書「実験核物理学」3巻本を書き上げる。ムーヒンは、160件以上の核物理学、素粒子物理学に関して、単著、共著がある(特に、7冊の本)。教科書及び科学啓蒙書は、何度も再版され、6カ国語に翻訳もされている。教科書の第3版は、1977年に、ソ連邦政府勲章を授与された。第7版は2009年に出版された。それ以外に、2008年と2011年に、新しい科学啓蒙書「愛好家のための核物理学」と「ノーベル賞レベルのロシアの物理学」(第2版)が出版された。

(2013年7月9日)