

国際リニアコライダー(ILC)計画とは

岩手県立大学
学長 鈴木 厚人

1 はじめに

ILCとは「インターナショナル・リニアコライダー」の略です。話の前半は「ILCが目指す素粒子、宇宙の謎解き」についてです。この中で皆さんを最先端の素粒子物理学と宇宙物理学にご案内します。恐らく頭の中が混乱してクラクラすると思うのですが、私も20～30年かけてようやくここまでたどり着いたのです。後半は、ILCの現状と、北上山地に建設されることを想定してこれからどのような準備をしなければならないかを話します。

2 国際リニアコライダー (ILC) が目指す素粒子、宇宙の謎解きとは？

まず、この宇宙・この世の中は一体なにが支配し、なにからできているのでしょうか。このような疑問は大昔からありました。古代エジプトでは天の女神と大気の神がこの宇宙、この世を支配している、古代インドではヘビとカメとゾウが支配していると伝えられています。そしてギリシャ時代になると、支配をしているというよりは科学とし

て、物質の素（アトム）とは一体何だろうかということに興味が移りました。そして当時は、火、空気、水、土が身の周りの物質の素だと議論しています。このような思考は、その後も繰り返し行われ、現代の物質の究極像、すなわち素粒子の描像に至っています。

では素粒子研究の手法、すなわち小さなものを見る方法を考えてみましょう。例えばスイカの中がどのようなになっているのか確認したい時は、まず、叩いてみるのでしょうか。そして、叩いてもわからない時には壊して、直接中を見ます。素粒子も同じです。まずは、叩く、壊す手段を用います。

例えば、中身を知りたい物質があるときには、粒子をぶつけて出てくる粒子の種類や、物質の壊れ方を調べます。しかし、素粒子は非常に小さいので1発ぶつただけでは、スカスカでまったく当たりません。水素原子は中心に陽子があり、電子が1個その外を回っています。陽子の大きさを1メートルとすると、その周りを電子は山手線ぐらいの軌道を描いて周回しています。そのため1発ではなく、まとめて200億とか300億ぐらいの粒子を塊にして物質にぶつけます。そうすると、その中の数個がまれに反応を起こします。

ILCの場合は、もっともっと高いエネルギーでぶつけます。それによって激しく壊し、様々な粒子をたたき出すことができます。さらに、静止している粒子の塊に粒子の塊を加速してぶつけるのではなく、互いの塊を加速して正面衝突させることによって、もっと壊すエネルギーを大きくします。このように叩く・壊すという方法で、小さな世界を調べます。

ギリシャ時代は水や空気、火、土が物質の素だとしていましたが、現在は、皆さん知っているように水は分子（ H_2O ）の集まりです。さ

らに、水分子は水素原子2個と酸素原子1個でできていて、水素原子は真ん中に陽子があり、その周りを電子が回り、酸素原子は真ん中に原子核があり、原子核の周りを電子が8個回っています。

原子核は、陽子と中性子でできています。私が大学院に入った頃は、陽子や中性子は素粒子と扱われていました。しかし、その陽子や中性子の中にはさらに粒々があることが発見され、それをクォークと名づけました。現段階では、私たちの身の回りの物質の最小単位：素粒子はクォークと電子です。ではどのぐらいの大きさなのでしょう。陽子の大きさをパチンコ玉の大きさに例えると、人間は太陽系ほどの大巨人になります。したがって、太陽系ぐらいの大きな人が、パチンコ玉の中を一生懸命調べている、これが素粒子の研究者とってください。

では、私たちがこれまでに理解した素粒子像を紹介します。先ほどは身の回りの物質の素は電子とクォークと言いましたが、宇宙全体を見渡すともっと多くの素粒子から宇宙はできています。クォークは6種類、d（ダウン）、b（ボトム）、c（チャーム）、s（ストレンジ）、u（アップ）、t（トップ）あります。なお、この名前ですが、発見した人が名前をつける権利を持っていて、太郎さんや花子さんと同じように命名は自由です。それから、電子は軽い粒子の意味のレプトンのひとつです。他にはミュー粒子、タウ粒子、電子ニュートリノ、ミュー・ニュートリノ、タウ・ニュートリノが存在し、レプトンも計6種類です。さらに、これらのクォークやレプトンには、それらの反粒子が存在します。例えば電子の反粒子は陽電子で、陽電子はプラスの電気を持っています。このように反粒子は、姿、形は全く粒子と同じですが、符号のみが正反対の粒子です。

日本で最初にノーベル賞を受賞された湯川秀樹先生は、原子核内の陽子や中性子は粒子を投げ合って（交換して）結合していることを示しました。この力を媒介する粒子のことをゲージ粒子と呼んでいます。現在の力の素の粒子には、光子、グルーオン、弱ボゾン、重力子の4種類あります。光子は電気と磁気の力を及ぼします。グルーオンは強い力を媒介して、クォークを結びつけます。弱ボゾンは弱い力を媒介します。例えば地熱は放射性物質が崩壊する時に発生する熱ですが、弱い力は放射性物質の崩壊を引き起こします。そして、皆さんがよく知っている重力は重力子の働きです。

ここで素粒子を整理すると、クォーク6種類、レプトン6種類、ゲージ粒子4種類になります。

そして最後に登場するのが「ヒッグス粒子」です。クォークやレプトンやゲージ粒子に質量を与える役割をする素粒子です。この粒子は、スイスのジュネーブ近郊にあるセルンという研究所で最近発見されました。

ヒッグス粒子が発見された当時、物質の素のクォークとレプトン、力の素のゲージ粒子、最後に質量の素のヒッグス粒子が見つかり、これで自然のパズルは解けた、もうこれで素粒子物理学はおしまいで、ヒッグス粒子は神の粒子とも言われました。

しかし、当時私はヒッグス粒子のような都合の良い粒子は存在しないだろうと思っていました。その理由は素粒子物理学がもっと複雑だからです。実際にヒッグス粒子が発見されましたが、もうこれでおしまいなのではなく、そのおかげで、益々複雑になったと考えています。

ヒッグス粒子が粒子の謎解きの最後ではないという理由を話します。第1表を見てください。クォーク6種類とレプトン6種類が並ん

第1表「素粒子の分類」

	第一世代	第二世代	第三世代	電荷		
クォーク	u(アップ)	c(チャーム)	t(トップ)	2/3	ゲージ粒子	γ (光子)
	d(ダウン)	s(ストレンジ)	b(ボトム)	-1/3		g (グルーオン)
レプトン	ν_e (電子ニュートリノ)	ν_μ (ミューニュートリノ)	ν_τ (タウニュートリノ)	0		W (弱ボゾン)
	e(電子)	μ (ミュー粒子)	τ (タウ粒子)	-1		G (重力子)

でいます。それぞれ電荷の異なる素粒子の組が4組あり、各組では3個の素粒子が同じ電荷を持っています。一つの規則性を示しています。次に、縦の列では、第一世代、第二世代、第三世代と名付けて区別します。第一よりも第二の粒子の質量が重く、第二よりも第三のほうが重いという規則性がここにもあります。さらに、電荷の異なる4組に対応して、力の媒介粒子（ゲージ粒子）も4個あります。このような性質が繰り返す規則性の背後に何かの仕組みがあるのではないかと疑問が出てきます。

規則性に注目すると、元素の周期表が思いだされます。水素は1個、ヘリウムは2個、リチウムは3個、ベリリウムは4個の電子が中心にある原子核を周回しています。この電子の配列によって性質が繰り返されます。周期表の縦の列の元素は同じ性質を持ちます。このことは、原子はより基本的な構成要素の原子核と電子から成り立っているためです。すると、クォークやレプトンはさらに基本的な構成要素から成り立っているのではないかとということが考えられます。

そこで、次の段階は現在の素粒子よりも、もっと基本的な素粒子像をつくることです。最終的には宇宙は1種類の素粒子からできている

第2表「元素の周期表」

元素の周期表

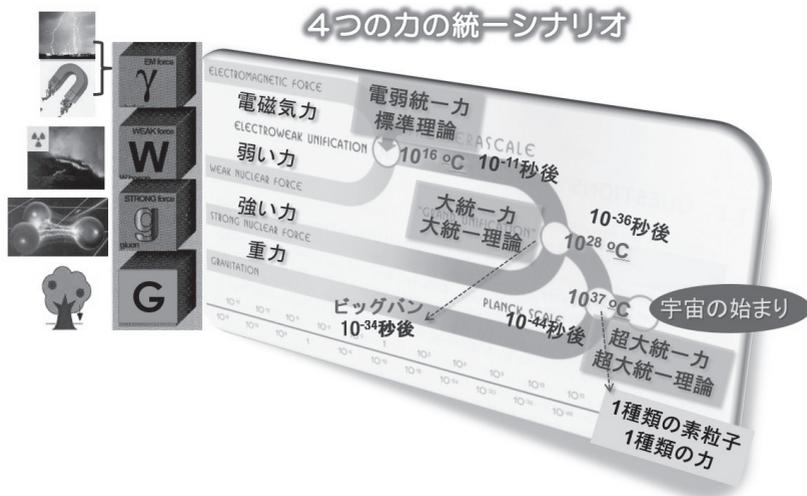
	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	H															He		
2	Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	A															
			L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- 典型金属元素
- 半金属元素
- 非金属元素
- 遷移金属元素
- 希ガス

【出典：<http://1231231234123.web.fc2.com/kimon.html>】

描像です。これを素粒子の統一といい、最先端の素粒子物理学の課題です。

素粒子を統一する試みは、力の統一、すなわち4種類ある力を媒介する粒子を一種類に帰することで実現されます。それは次のとおりです。クォークはグルーオンのボールを投げて、強い力を働かせます。このグルーオンを投げられるのはクォークだけです。粒子と粒子が反応を起こすときに、グルーオンを投げている粒子を見たら、あなたはクォークですねと言えます。また、ニュートリノは弱い力の弱ボゾンしか投げられません。弱ボゾンのみの1種類の球種を投げているピッチャーを見たら、それはニュートリノです。電子は弱ボゾンと光子の



第1図 4つの力の統一シナリオ

【出典：著者作成】

2種類のボールを投げます。

では、力が1種類だったらどうでしょうか。粒子は皆、同じボールを投げています。そこでは、粒子の区別がつきません。すなわち、力が1種類になると素粒子も1種類になります。ここが究極の素粒子の世界です。今、素粒子研究はこの方向に進んでいます。そして、ILCによってこれを調べるのです。

素粒子1種類すなわち力を1種類にするには、一挙にはなく順次進めていきます。まず、電磁気力の光子と弱い力の弱ボゾンの統一を試みました。これが素粒子標準理論と呼ばれているもので、6種類のクォークとレプトン、4種類のゲージ粒子、それにヒッグス粒子を含む理論です。統一された力を電弱力といいます。次のステップは、3つの力、電磁気力+弱い力+強い力を統一する素粒子大統一理論の構築です。この理論は全ての物質に含まれている陽子が寿命を持つこと

を予言しました。そして、陽子崩壊の検出を目指した実験が世界で行われました。日本でも2002年にノーベル物理学賞を受賞された小柴先生が陽子崩壊検出器を提案し、神岡鉱山で実験を始めました。これがカミオカンデです。しかし、陽子崩壊はまだ検出されず、陽子の寿命は予言よりも長いことが判明し、大統一理論の修正が行われています。最終ステップが重力を含む4つの力の統一で、超大統一理論の確立です。

超大統一理論が支配する世界は力が1種類のため、素粒子も1種類になります。ではこのような世界を作って調べるには、どのようにしたらよいでしょうか。計算によると、温度が 10^{16} ℃以上になると電弱統一状態、 10^{28} ℃以上で大統一状態、 10^{37} ℃以上で超大統一状態が実現されます。このような莫大なエネルギーを持つ世界が、これまでの宇宙にあったと推測されます。それは「あること」から 10^{-44} 秒以前が超大統一、 10^{-36} 秒までが大統一、 10^{-11} 秒までが電弱統一の世界です。この「あること」とは「宇宙の始まり」です。宇宙の始まりは莫大なエネルギーもっていて、宇宙が膨張するにつれて冷えて温度が下がり、 10^{-44} 秒後に超大統一力が重力と大統一力に分離し、 10^{-36} 秒後に大統一力が分離して重力+強い力+電弱力になり、さらに温度が下がって、 10^{-11} 秒後に電弱力が分離して現在の重力+強い力+弱い力+電磁気力の4種類の力が働く宇宙になったと考えられています。皆さんがよく知っているビッグバンは、宇宙が誕生してから 10^{-34} 秒後の出来事です。

物質の基本構成粒子である素粒子の研究を進めていったら、宇宙の誕生とその後の進化の研究が同じことであるとわかりました。ILC計画では、今まで話してきたストーリーを検証することを一つの目的に

しています。したがって、ILCは素粒子顕微鏡と宇宙望遠鏡の両方の働きをします。

3 ILCとは？

ILCとは、全長約30kmの地下トンネルの両端から電子とその反粒子の陽電子を超伝導加速技術によって加速して正面衝突させ、ビッグバン前後の宇宙を調べる装置です。電子や陽電子を一個ずつ加速するのではなく、まとめて200~400億個つくり狭い空間に閉じ込めます。前に話したように、電子や陽電子はあまりにも小さく密にしないと衝突しません。例えばシャープペンシルの芯を想像してください。シャープペンシルの芯の直径が数ナノメートル (10^{-9} メートル)、長さが数ミクロン (10^{-6} メートル)、そのような芯状の粒子の塊、これを粒子ビームと呼びますが、このペンシルビーム同士を正面衝突させます。月の引力で岩盤は数ミクロン動きますので、衝突させるには難しい技術が要求されます。

ILCの開発に日本は25年程前から取り組んできました。その後、世界でバラバラに開発をしているのは、経費や人員の重複の無駄が多く、力を合わせて開発を行うべきとの機運が高まりました。その結果、アジアは日本の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が、ヨーロッパはドイツの電子シンクロトロン研究所が、アメリカ・カナダはアメリカのフェルミ国立加速器研究所が各地域の技術開発をまとめ、それらを統合して開発研究を進めてきました。

そして、2004年に、幾つかの加速方式の中から超伝導加速方式を採用することに決定しました。超伝導は抵抗が少なく、注ぎこんだ電力の浪費を少なくする利便がありますが、技術開発は容易ではありません

ん。しかし、超伝導に決断し、世界中の研究者がまとまって統一の開発チームを結成して技術開発を行いました。そして、2007年に概念設計書、2011年に技術設計書の中間まとめ、2012年の末には技術設計書が完成しました。総勢2000人を超える世界の研究者がこの計画に参加し、産業界・民間と研究機関の緊密な産学連携によって達成できたのです。

技術設計報告書 (Technical Design Report)

経費見積もり

TDR署名: 2400名 48カ国 400研究機関

1. 加速器建設費 : 9,907億円 (土木工事、加速器本体、労務費)
2. 測定器建設費 : 1,005億円 (測定器2台、労務費)
3. 不定性 : 建設費の25%
4. 年間運転経費 : 491億円 (光熱水料、保守点検費、労務費)

段階的エネルギー増強シナリオ

- (1) 建設・コミッショニング (10年間)
 - 250GeV用加速器・土木・施設・研究所建物: フルスベックの76%のコスト
 - トンネルはフルスベックの31 km
- (2) 第一期250 GeV運転 (5年間) + エネルギー増強 (1年間)
 - 人件費: 850FTE、機器保守費: 設備費の3%、電気代: 2012年12月時点
- (3) 第二期370 GeV運転 (5年間) + エネルギー増強 (1年間)
- (4) 第三期500 GeV運転 (8年間)

第一期30年間の総経費 : 20,732億円

← 国際分担 (日本の分担を50%とすると350億円/年)

38

第2図 ILC経費見積もりと研究計画

【出典: 著者作成】

技術設計書完成の次、すなわち2013年からはILCの建設実現に向けての取組を進める時期です。経費見積もり及びスケジュールについては第2図の通りです。第一期は30年計画で、建設・運転・人件費等の全経費の総額は約2兆円になります。費用負担をいかに国際分担するかについては、これからの政府間交渉の重要な課題ですが、議論のたたき台として誘致する国が半分、残りの半分は諸外国が負担すること

を提案しています。この案では、日本の負担額は30年間で約1兆円、つまり年間約350億円になります。この規模の研究事業に国際宇宙ステーションがあります。去年の予算が357億円で、過去20年間の総額が8,300億円でしたので、これから10年間を加えると約1.1兆円になります。国際宇宙ステーションとILCはほぼ同規模のプロジェクトといえます。

2013年には、残りの技術開発、建設前後のスケジュール、エネルギー増強計画、調査費、研究所等について実行プラン、5か年計画を作成しました。さらに文科省には、ILCの事業評価や各国政府との協議を早く進めていただき、経費の国際分担について決めて欲しいと要望しています。

4 ILCが日本に、岩手にやってくる

ILC建設候補地として、2003年頃に日本の12カ所を候補地を選び、検討を進めました。そして2006年からは岩盤力学学会や土木学会の多くの先生方の支援・協力を得て、道路やトンネル工事等のデータをもとに調査・比較し、2010年に九州の背振山地と岩手県の北上山地の2地域に絞りました。その後、これらの地域のボーリング等、より詳細な地質調査を行い、2013年に最終候補地を決める立地評価委員会を立ち上げました。

その結果、技術的および社会環境の観点からILCの候補地として北上山地を選定し、「北上サイトにおける中央キャンパスは、仙台・東京へのアクセス利便性を有し、研究・社会環境に優れる新幹線沿線の立地を強く推奨する」ことを付帯条件に付けました。この評価には、環境アセスメントや岩盤、交通、都市工学などの日本の100人以上の

研究者が参加し評価をしました。北上山地が選出された理由としては、まず、技術評価では圧倒的に北上山地の岩盤が固いということが挙げられます。一方、背振については、アクセスが複雑であり、また水平に掘れず、斜めに掘らないと30 kmの長さがとれないこと、湖の下をトンネルが通ること、さらに将来計画としての50キロや70キロのトンネル掘削が海に入ってしまうなどが懸念されました。^[1]

これからは一致団結して北上山地での建設に向けての準備開始です。既に国内外の多くの研究者が北上サイトに来て、調査を開始しています。

5 ILC国際科学圏をつくろう

ILCの建設によって、急に何か突拍子もないことが起きるなどというのではなく、時間をかけて着実に国際地域を構築していかなければなりません。もちろん様々な意見がありますので、あくまでも基本的な姿勢です。まず、科学圏についてです。私は世界の関連する研究所をスクラップして、1つのILC研究所をつくるのには反対です。ヨーロッパは多くの研究所を集中させて、世界最大の研究所：セルンを作りました。しかし、ヨーロッパ各国では自国における新たな技術開発や教育を行うことに不便を感じています。まだヨーロッパはEUとしてまとまっているので良いのですが、ILCはそうはいきません。世界各地で研究や教育の基盤を維持しながら、ILCに参加する方式が望まれます。

私たちは、世界各国の研究所が北上地区に分室をつくり、これらを統合してILC研究所とする方法を提案しています。ユネスコの研究機関のような形態です。例えば、南極大陸には各国の基地があります。

人件費や電気代はそれぞれの国が自前でまかっています。ILCも同様で、日本の中に各国の研究施設があるわけで、必要経費はそれぞれで分担することになります。

岩手県立大学に来る前に、私がKEKの機構長を務めていた去年の11月、ILCへの第一歩としてセルンとKEKがそれぞれの研究所内に分室をつくりました。これによって人的資源や予算の無駄をなくし、共通する技術開発をお互い協力し合って進め、世界の素粒子研究を先導しよう決めました。これをILC研究所、すなわち多国籍研究所を構築する先駆にするつもりでした。

6 ILC国際住居圏をつくろう

国際住居圏をつくる構想に対して、様々な意見があります。私は次のように考えています。例えばよく見るのが宇宙都市のような都会的・近代的な都市です。しかし、住環境については一般的な町並みや田舎風でよいと思います。KEKのあるつくば市でも外国人はむしろ民家に住みたがります。畳の部屋がいいと言います。来日する研究者やその家族は、何十年もここに住むわけではなく、長くとも5年くらいでしょう。西洋的な雰囲気ではなく、日本文化あふれる居住空間や環境を満喫したいと望んでやって来ます。それには、現有施設、設備、衣食住環境等を最大限活用し、不足部分を補うことを提案したいと思います。外国人をちやほやするのではなく、いかにして日本の中に溶け込んでもらうか、外国人を区別しないで対等に付き合うかが「おもてなし」ではないでしょうか。

同様に使用する言語についてですが、研究関連の主言語は英語、副言語は日本語、そして居住区及び教育機関での主言語は日本語、副

言語は英語等のそれぞれの国の言葉にすべきと思います。ロシア人やスペイン人、フランス人等々の各国の家族の人たちは、必ずしも英語を喋りません。自国語です。したがって、研究関連以外で主言語が英語ということ自体に無理があります。つくばにも多くの外国人が居住していますが、外国の子供たちは日本人と同じようにランドセルをしょって小学校に行きます。特別な扱いは全くしていません。外国人が日本に来たときに、日本の文化や言葉も修得しないで帰国したら、何のために日本に行ったのかと思われるでしょう。日本の文化や言葉をどんどん教え、その結果、子供たちが大きくなったら日本にまたやって来たいと思えるようなやり方を取るべきでしょう。

したがって、住環境も言語もいかにして日本に溶け込んでもらうかが第一です。そのためには、日本語研修センターやボランティア組織の充実が重要です。また、緊急時にはILC研究所の中のユーザーズオフィスが中心となり、責任を持って県や市町村と連絡調整をし、緊急時の対応するような体制づくりも必要です。

7 まとめ

最後に、ILCについては、色々な考えをお持ちの方がいらっしゃるので、そういう方々に対して疑問点を丁寧に説明しないと行けません。ILCの予算規模の疑問や、環境破壊の規模、廃棄処理施設への転用等について誇大した解釈が時折、見受けられます。これらの疑問に対してひとつひとつ答えていかななくてはなりません。私はこれまでは世界に向けてILCを日本に誘致することに力を入れてきましたが、これからは岩手県に来ましたので、国民・県民の皆さんに対してILC建設の説明をしていきたいと考えています。

【参考文献等】

- [1] ILC戦略会議HP 「【プレスリリース】 国際リニアコライダー国内候補地の立地評価会議の結果について」

<http://ilc-str.jp/topics/2013/08231145/>