資料 1

10月16日(火)@日本学術会議 第8回国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会 ・第8回技術検証分科会合同会議

素粒子研究における 国際リニアコライダー計画 について

中家 剛(京都大学)

国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会での懸案事項

- 1. 学術会議では、文部科学省からの審議依頼を受けて、国際リニアコライダー計画に関する審議を行っております。これまで、各方面、特に、主としてILC計画を推進する立場の研究者に参考人として来ていただいてお話を伺ってまいりました。この先、審議依頼への回答をまとめて行く段階に入りますが、それに際し、加速器/非加速器を含めた素粒子実験のコミュニティの中での本計画に対するご意見を拝聴したいと思っております。
- 2. 参考人としてお出ましいただく候補者として、永宮正治先生から中家先生をご推薦をいただきました。もちろん、ご自由に個人的 見解を述べていただければ結構ですが、 ご参考までに申し上げると、私が知りたいのは、たとえば以下のような点です。
- 3. 現在の素粒子物理学において、「標準理論の先」が最大の課題であろうことは想像に難くありませんが、標準理論を超える物理の探索にはいろいろなアプローチがあるものと思います。 その中で、ILCが primary target とする「ヒッグス結合の精密測定」というアプローチが、最優先ないし最有力と見なされているのかどうか。 そのあたりに関して素粒子研究者の間でどの程度のコンセンサスがあるのでしょうか。
- 4. 標準理論を超える物理の探索にどのようなアプローチが提案され、また、実験的に追及されているのでしょうか。
- 5. ILC推進者によれば、ヒッグス粒子と他の素粒子との結合定数の精密測定の結果、標準理論からのズレの大きさとパターンがどのようになるかによって、超対称性シナリオや、余剰次元シナリオや、ヒッグス複合粒子シナリオなど、次に探究すべき研究の方向性が決まる、との説明です。 一方、標準理論からのズレが見いだされない場合は、その理由は不明のままに残り、場合によっては「人間原理」を持ち出したりするなど、研究の方向性が見えません。「ILCでは結局何もわからなかった」ということにならないでしょうか。
- 6. 「もし、そうなったら、われわれの手の届くエネルギー範囲には手がかりはなさそうだから、加速器ベースの素粒子実験はいさぎよく店仕舞いする」というなら、それはそれで理解できますが。 レプトン・コライダーによる実験が clean かつ democratic であり、ハドロン・コライダーと相補的であるということは理解しています。 一方、LHCは既に稼働しており、さらに今後 luminosity upgrade に伴って大量のデータを産出することになるでしょう。 データ解析は複雑ですが、解析手法の進歩によって、 従来は「レプトン・コライダーでなければできない」、と言われていたものも結構できるようになるのではないか、という点についてはどうでしょうか。

Outline

- (素粒子) 物理学が直面する大問題
- 高エネルギー物理学の現状
- ヒッグスの物理とILC計画
- ILCの物理
- ILCへの個人的意見

参考資料

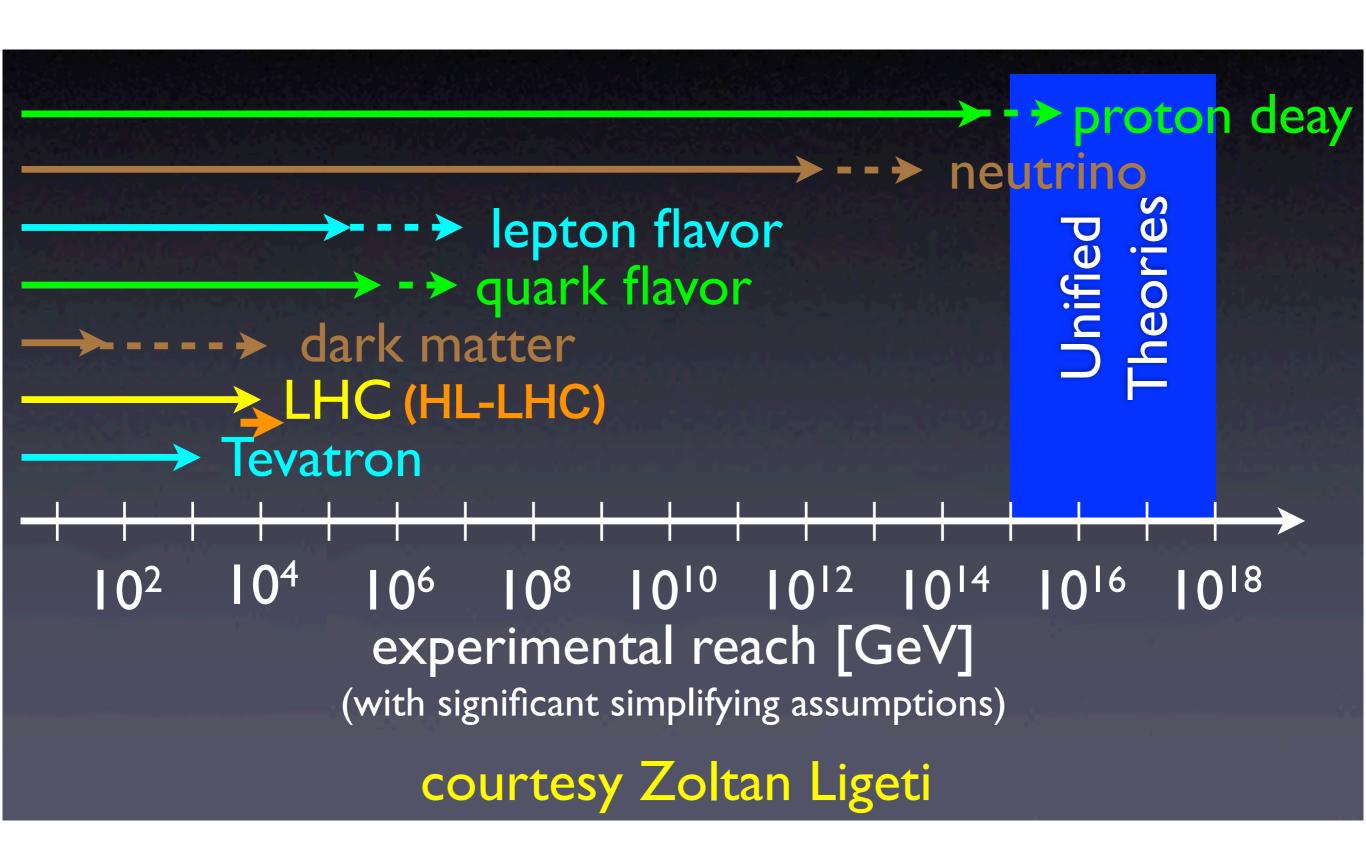
- 高エネルギー物理学将来計画検討委員会答申(2017年9月)
 - http://www.jahep.org/files/20170906.cfp.pdf
- ILC 250GeV Higgs Factory の物理意義を検証する委員会報告書
 - http://www.jahep.org/files/ILC250GeVReport0622Final.pdf
- 国際リニアコライダーホームページ
 - https://www2.kek.jp/ilc/ja/index.html

•

物理学が直面する大問題

- 暗黒物質
- ・加速する宇宙(暗黒エネルギー)
- ・物質優勢な宇宙(消えた反物質、物質と反物質の非対称性)
- インフレーション(インフラトンとは?)
- ・ 大統一理論: 力の統一、クォークとレプトンの統一
- ・ニュートリノ質量(様々な質量の起源)
- ・ ファミリー構造(世代の起源)
- 他にもいくつかアノマリーもある(例:ステライルニュートリノ等)
 - → 上記を説明する「新しい物理」のエネルギースケールが未定!

(個人的見解) 広いエネルギースケールの探索が重要



http://www.jahep.org/files/20170906.cfp.pdf

高エネルギー物理学将来計画検討委員会 答申

石塚 正基(幹事)、石野 宏和、石野 雅也(委員長)、大谷 航、 帯名 崇、北口 雅暁、北野 龍一郎、阪井 寛志、佐貫 智行(幹事)、 谷口 七重、戸本 誠、中平 武、南條 創、樋口 岳雄、 松本 重貴、森山 茂栄、吉岡 瑞樹

September 6, 2017

答申

2012年、LHCにおいて質量 125 GeV のヒッグス粒子が発見され、3世代ニュートリノ混合が確立された。この期を捉え、本委員会は日本の高エネルギー物理学の基幹となる大規模将来計画に関して、以下の提言をする。

- LHCにおいて質量 125GeVのヒッグス粒子が発見された今、ヒッグス粒子の詳細研究によって標準モデルを超える物理の方向性を示すべく,衝突エネルギーを 250GeV とする国際リニアコライダー (ILC) の日本国内での建設をただちに開始すべきである。並行して、LHC およびそのアップグレードによる新物理の探究を間断なく続けるべきである。
- 3世代ニュートリノ混合が確立し、レプトンセクターにおける CP 対称性の研究への道筋が示された。今後は T2K 実験による CP 対称性の破れの探索と J-PARC ニュートリノビームの増強を継続して進めつつ、陽子崩壊探索にも優れた感度を持つハイパーカミオカンデの早期実現を国際プロジェクトとして推進すべきである。

高エネルギー委員会は、これらの基幹となる大規模計画の早期実現を目指し、あらゆる手段をもって取り組むべきである。

現在建設中のSuperKEKBについては、予定通り完成させて物理結果を出していくことが肝要である。また、現在計画中の中小規模計画の幾つかは、ニュートリノ物理のように重要な研究分野に発展していくポテンシャルを持っている。これらを並行して推進し、多角的に新しい物理を探求していく必要がある。J-PARCでのミューオン実験を始めとするフレーバー物理実験、暗黒物質やニュートリノを伴わないニ重β崩壊の探索実験、宇宙マイクロ波背景放射偏光のBモード揺らぎ観測や暗黒エネルギー観測は、これに該当する研究と考えられる。

さらに、今後得られる新しい実験結果が、より高いエネルギースケールの新粒子・ 新現象の存在を示唆した場合に備え、粒子加速エネルギーを飛躍的に向上させるた めの加速器開発研究を継続しておこなっていく必要がある。

- ILC250
- LHC, HL-LHC
- T2K
- ・ハイパーカミオカンデ
- SuperKEKB
- ・ミューオン物理+フレーバー物理
- 二重 B 崩壊
- CMB-B偏極

素粒子からの宿題

	Higgsの性質 解明	階層性の謎・ 電弱対称性の 破れの起源	世代の謎・CP の破れの起源	4つの相互作 用の統一・相 互作用の起源	ニュートリノの 性質解明・質量の起源	物質と反物質 の非対称の起 源	暗黒物質 の正体	インフレーショ ンの正体	宇宙加速膨張 の起源
ILC•LHC	Higgs Coupling• additional Higgs	SUSY·新粒 子	Higgs CP	Gauge Coupling		Higgs自己結 合•extra scalar	直接生成		
ニュートリノ 振動・ 陽子崩壊			ニュートリノ CPV	バリオン数 の破れ	ニュートリノ 混合行列	ニュートリノ CPVとPMNS 行列	間接検出		
B,D,K	崩壊分岐比 の異常 (荷電ヒッグ ス)	崩壊分岐比 と角度分布	CPV・新物理 によるフレー バーの破れ			新しいCPV	軽い暗黒物 質		
muon , tau		の異常	LFV, μ- EDM, g-2	LFV		μ-EDM	g−2 • <i>μ</i> −EDM		
中性子		寿命測定	T-Violation			EDM • n - ō振動			
地下 & Ονββ		WIMP		マヨラナ性 (see-saw)	マヨラナ性	レプトン数の 破れ (レプトジェネ シス)	直接検出		
宇宙				インフレー ション	トータルマス ・ 世代数		暗黒物質の 分布	原始重力波	状態方程式
	Higgsの性質 解明	階層性の謎・ 電弱対称性の 破れの起源	世代の謎・CP の破れの起源	4つの相互作 用の統一・相 互作用の起源	ニュートリノの 性質解明・質 量の起源	物質と反物質 の 非対称の起源	暗黒物質 の正体	インフレーショ ンの正体	宇宙加速膨張 の起源

宇宙からの宿題

ILC 250 ヒッグスファクトリーの 物理意義を検証する委員会

7/22 高エネルギーコミュニティーの皆様へ報告

浅井祥仁(東大)田中純一(東大 ICEPP) 後田裕(KEK) 中尾幹彦(KEK) Tian Junping(東大 ICEPP) 兼村晋哉(大阪大)松本重貴(東大IPMU) 白井智(東大IPMU) 遠藤基(KEK)柿崎充(富山大学)

http://www.jahep.org/files/ILCmemo170722final.pdf

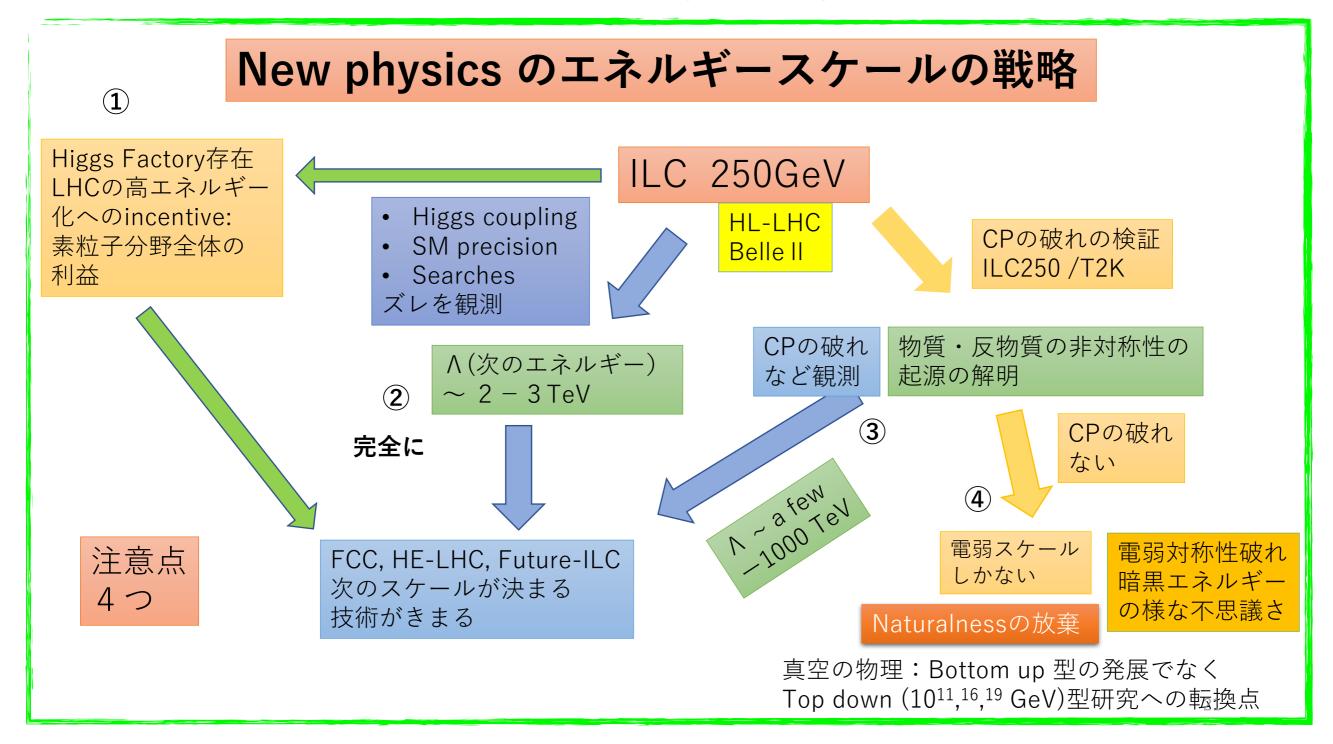
イントロダクション

- **1) 時期: HL-LHCと同時期**に走る 2030 スタート → HL-LHC **相補的な効果**
- 2) L=120-240 fb⁻¹ /year (TDR & 2 bunch) で Maximum 360fb⁻¹ / year → 1 0年で 2ab⁻¹ LCの利点: 偏極 **陽電子30% 電子 80%**
- 3) ILC以外の成果も大事 \rightarrow ILC250が加わることで何が言えるか?

2040年頃に 期待されている 物理を総動員

Synergy

HL-LHC (top mass, Higgs coupling, direct search) SuperKEKB (rare decay, charged Higgs, CP phase) T2K (CPがあった場合 \rightarrow レプトジェネシス シナリオ) double β 崩壊 (\rightarrow レプトジェネシス シナリオ) EDM (\rightarrow 電弱バリオジェネシス) LFV (\rightarrow レプトジェネシスシナリオ) 宇宙空間での重力波測定 (\rightarrow 電弱バリオジェネシス) Lattice QCD (α s, m_c, m_b)、理論の高次補正



- ILCが探るエネルギーは電弱スケール(TeV近辺)
- Naturalness(自然さ)をどれだけ真剣に取るかで、意見が分かれる。

ヒッグスの物理

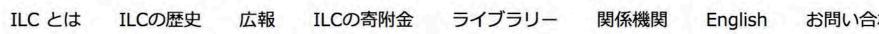
- ヒッグス粒子
 - ・スピンゼロ
 - 質量: 125 GeV/c²
 - 電弱対称性の破れ(W, Zの質量)
 - ・ 質量の起源 (湯川結合)

- ・2012年に発見。まだあまり精密に測定されていない粒子。
- 研究対象としてユニーク

• ヒッグスファクトリーは次の加速器計画として重要。

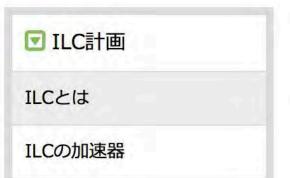
ILC計画

- ILC250はヒッグスファクトリー
 - 中国はリングコライダーでヒッグスファクトリーを提案。
 - ・現時点では、計画提案の時期、R&Dの長さ、これまでの加速 器建設の経験から、ILCの方が実現性が<u>高いと言われている</u>。
 - 難しい加速器であることは事実で、ヒッグスファクトリーに特 化した時にベストのチョイスかどうかは分からない(私見)。
 - ILC研究者は将来の拡張可能性を強調する。ただし、拡張に必要な予算も大きい。





https://www2.kek.jp/ilc/ja/contents/project/history.html



■ ILCの歴史 (2017.11.15 更新)

リニアコライダーは1960年代に発案され、精力的な研究は1980年代半ば頃から世界各国で始まりました。ここに、今日までの発展の歴史を 簡単な年表にまとめてみました。

1984年

昭和59年、日本でのリニアコライダーの開発研究スタート。はじめはS-band (2856MHz, 常伝導)まもなくX-band (11.4GHz)

ホーム

1987年

日米協力によるリニアコライダー研究スタート。 SLACにて最初のワークショップ (SLAC)

1990年

TESLA(1.3GHz、超伝導)参入。この時点で、X-band, C-band、S-band、CLIC、TESLA、VLEPP の6つの競争

1993年4月

高エネルギー委員会が提言「高エネルギー物理に 於けるリニアコライダー開発研究計画について」 を出す (高エネルギー委員会)

1997年5月

平成9年、高エネルギー物理学将来計画検討小委員会 最終答申、リニアコライダーの早期建設を提言 (高エネルギー物理学将来計画検討小委員会)



ILC計画

- ・日本でのリニアコライダー計画の始まりは1984年。私が学生の時 (1990-1995年)には、日本の高エネルギー物理学の最重要プロジェクトとして位置付けられていた。
- ・ 将来計画を議論するときに、ILCの物理的意義について主に議論してきた。ILCの予算は巨額であり、予算は別枠と仮定してきた。
 - ・ ILC建設のリスク(他の計画への予算圧迫やその影響等)を真剣に 考慮していない。
- 1984年から現在に至るまで、ドイツ、アメリカ(SLACとFermilab) もリニアコライダー計画を提案したが、どちらもうまくいかなかった (ドイツ:2003年、アメリカ)。今は、日本だけが残っている状況。
- 最近、中国がリングコライダーでヒッグスファクトリーを提案

ILCの物理 1

- ・ 当初(1990年代)のILCの物理はLHCと同時期に走ることで、
 - ・ ヒッグス粒子の発見(軽いヒッグスはLHCで発見しにくいと言われていた)
 - ・ (カラーを持たない) 超対称性粒子の発見 を目指していた。
- 現在、ヒッグス粒子は発見され、超対称性の証拠が見えないため、ヒッグス粒子の精密測定がメインテーマとなっている。
 - ・メインテーマは電弱統一のエネルギースケールの物理の探索。衝突型加速器 による研究で、電弱統一のエネルギースケールの精査は重要。
 - 電弱統一のエネルギースケールに新物理がなければ、プランクスケールまで 新物理がないと考えるのは、私は極論と考える。
 - ・ (例1)スーパーカミオカンデで陽子崩壊の信号が見えれば、大統一理 論の議論が一気に盛り上がる。
 - (例2)暗黒物質が軽いアクシオンライクな粒子かもしれない。。。

ILCの物理2

- 現在、ヒッグス粒子の湯川結合の精密測定により、新物理を探索しようとしている。
 - 探索感度の目安:
 - LHCの精度10% -> エネルギースケール: ~1 TeV
 - ILCの精度 1% -> エネルギースケール: 2~3 TeV
 - 特密測定によりモデルの識別等は可能であるが、その背後にある物理を 完全に特定するのは、極端なケースでないと難しいと考える(私見)。
- ・ (個人的には) LHCではできない、ヒッグス粒子の全崩壊巾(全ての粒子への結合の合計)を測ることが、ILCのみでできる重要な測定。暗黒物質の起源となる粒子がヒッグスと結合していれば、見える可能性もある。
- ヒッグスポテンシャルの情報がどこまで引き出せるかはILC250では限定的(ヒッグス粒子同時の結合を測る必要があるため)。このためには、より高いエネルギーが必要。

ILCの物理3

- ・ (家先生からの質問) データ解析は複雑ですが、解析手法の進歩によって、従来は「レプトン・コライダーでなければできない」、と言われていたものも結構できるようになるのではないか、という点についてはどうでしょうか。
- その可能性は常にあります。過去の例でも、ハドロンコライダーで
 - ・軽いヒッグス粒子の発見は難しい。
 - Bの物理は難しい。

等が可能となってきた。

・ヒッグスの精密測定の精度は、LHCで更に感度が上がる可能性は十分にあると思う。ただし、LHCで測れないと考えている量(全崩壊巾等)をどう測るのか今は良いアイデアを持たない。しかし、もしかすると将来見つかるかもしれない。

としか、言えない。

ILCへの個人的意見 1

- ・主に大学にいる研究者として
 - 計画が長すぎて、若手(大学院生+ポスドク+助教レベル)研究者のキャリアにはあまり向いていない。
 - ・実測定、データが存在しないため、研究は装置開発とシミューレーションが主となる。
 - ・物理結果が長年でない。
- ・議員連盟会長の手紙(次ページ)にもあるが、国家プロジェクトとして進めようとしていて、大学の一研究者の手を離れた感がある。プロジェクト=研究所の推進とより関係している?(私のうがった見方かもしれない)
- プロジェクトとして、様々な要因が関係しており、(大学の)研究者が、プロジェクトそのもののリスクを判断することが難しい。
 - (例) ILCが通れば、高エネギー物理学の他の研究(もしくはKEKが関係する研究)は全て止まるというような話をする人もいるが、予算枠も含めて、現実的な議論はできていない。

リニアコライダー国際研究所建設推進議員連盟 会長 衆議院議員 河村 建夫

日本学術会議の貴委員会におかれては、先月以来、見直し後の国際リニアコライダー計画 (以下「ILC」)について、研究の学術的意義等につき精力的に検討審議されていること に対し、深く敬意を表します。

ILCの学術的意義については、日本学術会議をはじめ、内外のアカデミアの方々のご判断に委ねるべきことは申すまでもありません。他方、前回2013年9月の「ILCに関する所見」の中で指摘された、「国家的諸課題への取り組みや諸学術分野の進捗に停滞を招かない予算の枠組み」については、今回の見直し案のご検討の中でも重要課題と推察します。そのご検討に資するべく、正に国家的諸課題に取り組み予算を議決する立法府の立場から、以下所感を申し添えます。

リニアコライダー国際研究所建設推進議員連盟(以下「ILC議連」)は、2006年に設置され現在 130 名を超える超党派の議員が参加しています。我々は、ILCを、科学技術を超えた成長戦略、安全保障等の国家戦略として捉え、その実現を推進しています。国内の要諦への働きかけはもとより、ILC議連の主要メンバーは、自ら欧米に赴き相手国議会や政府とのトップレベルの対話を重ねるなど、精力的に活動してきました。

ILC議連は、ILCの所要予算については、その規模と重要性を踏まえ、通常の科学技術・学術・大学予算の枠外にて措置すべく、国家プロジェクトとしての位置づけを検討しています。立法府におけるILCへの支持は、ILC議連だけではありません。自民党内では、科学技術・イノベーションはもとより、地方創生、国土強靭化、震災復興、知財戦略といった観点からも広がってきており、これらの党内関連推進本部および調査会が複数参加して、「ILC誘致実現連絡協議会」を近々に設置し、政治的な支援体制を構築致します。