

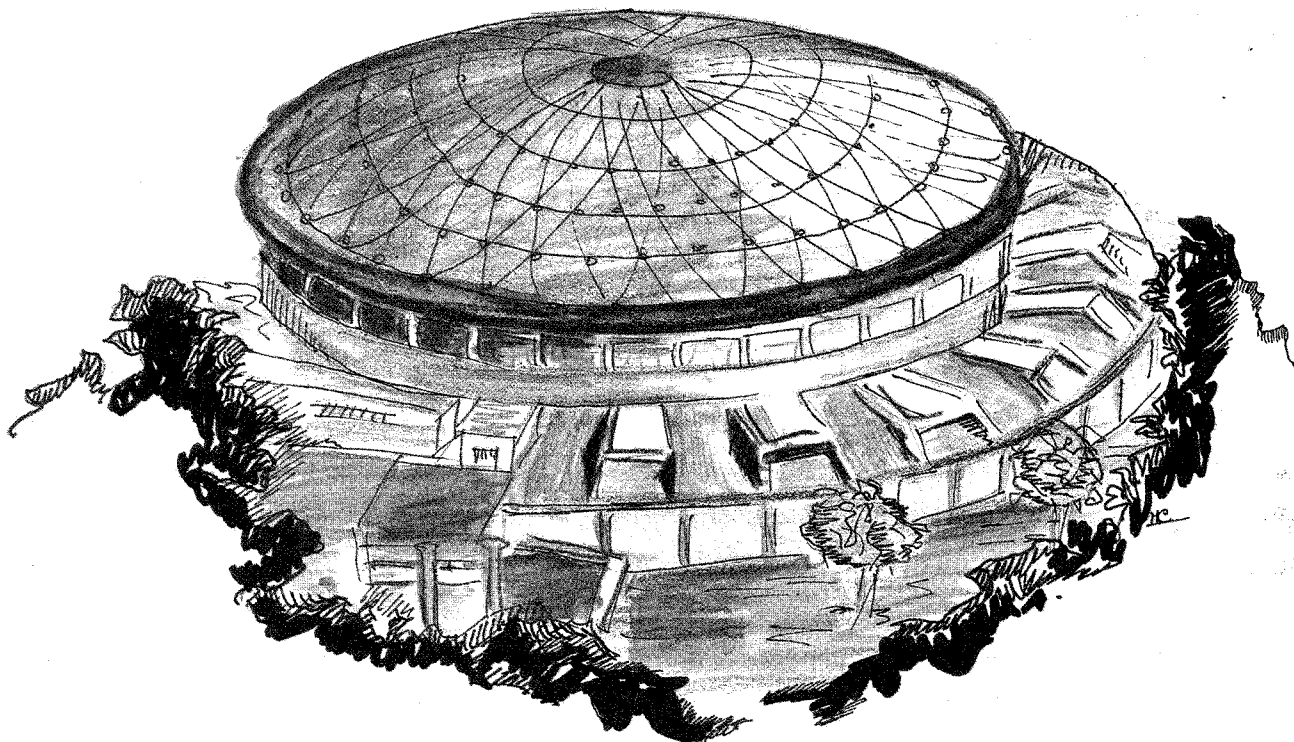


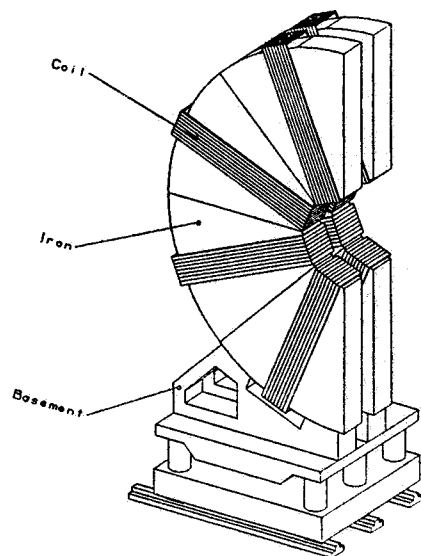
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-88/22(NT)
10 Maggio 1988

A. Cecchetti, B. Dulach, I. Laakso, G. Susinno:

ZEUS-MUON SPECTROMETER TOROID





Artistic view.

ZEUS-Muon Spectrometer Toroid

A. Cecchetti, B. Dulach, I. Laakso, G. Susinno
INFN- Laboratori Nazionali di Frascati, P.O. Box 13, 00044 Frascati (Italia)

1.- INTRODUZIONE

L'esperimento ZEUS, presso l'anello di accumulazione elettroni-protoni, denominato HERA, del laboratorio DESY ad Amburgo, è dedicato allo studio dei processi indotti dall'interazione elettrodebole ed all'approfondimento delle proprietà fondamentali dell'interazione stessa sino ad alti valori del momento trasferito tra elettrone e protone ($Q_{max}=10$ Gev). Il riconoscimento e la misura dei leptoni prodotti è una delle esigenze principali di un tale esperimento. La rivelazione dei muoni prodotti tra 4° e 35° gradi rispetto alla direzione dei protoni uscenti è uno dei compiti assunti dalla collaborazione Z-2 (Bologna, Cosenza, Firenze, Frascati, Milano, Palermo, Torino) in questo esperimento. A tal fine è in corso di realizzazione un apparato, siglato FMUON, che verrà installato nella sezione di uscita dei protoni.

L'apparato è composto di due parti. La prima per il riconoscimento dei muoni tra 18° e 35° gradi fa uso del filtraggio dato dal calorimetro e dal ferro di ritorno del campo magnetico generato dal solenoide centrale. L'energia del muone è misurata dalla deflessione generata da un campo toroidale indotto con bobine ausiliari in tale ferro. La traiettoria del muone è determinata da una camera a deriva posizionata prima del ferro e da piani di tubi a "streamer" limitati posti prima e dopo il ferro stesso. Per gli angoli compresi tra 4° e 20° gradi, la più alta energia dei muoni richiede l'aggiunta di due toroidi di ferro magnetizzato e di ulteriori camere a deriva e piani di tubi.

Il presente lavoro descrive in dettaglio il progetto dei toroidi e della supporteria relativa. [Fig. 1-2-3].

Per una descrizione generale dello spettrometro per muoni si rinvia allo "Status Report 1987" del rivelatore ZEUS ⁽¹⁾.

2.- DESCRIZIONE GENERALE

I toroidi, 6 metri di diametro esterno, 1,33 metri di diametro interno e 0.45 metri di spessore, sono costruiti con ferro dolce ed equipaggiati con bobine raffreddate ad acqua in grado di produrre all'interno del ferro un'induzione magnetica media di 1.7 Tesla, con una intensità del campo magnetico di 6600 A/m per toroide, con toroidi chiusi.

Ogni toroide, del peso di circa 100 tonnellate, è diviso sul piano verticale in due semitoroidi indipendenti composti ognuno di 4 settori uniti insieme mediante opportuna bullonatura.

Le bobine per la produzione del campo magnetico, costruite con conduttore di rame ad alta conducibilità e con raffreddamento interno, sono collegate elettricamente in serie.

Per consentire l'accesso ai componenti magnetici dell'acceleratore ogni coppia di semitoroidi è montata su di un carrello scorrevole su rotaie poste trasversalmente all'asse della macchina. Il movimento dei carrelli è ottenuto con un opportuno sistema a cilindri idraulici.

Durante il funzionamento, allo scopo di minimizzare le discontinuità del campo magnetico ed equilibrare le forze attrattive (circa 125000 daN tra le facce contrapposte), i semitoroidi sono accoppiati a due a due con la massima precisione utilizzando un opportuno sistema di serraggio. La precisione di accoppiamento e di posizionamento dei toroidi sull'asse dell'acceleratore è affidato a un sistema di regolazione in X-Y-Z.

Per eseguire le necessarie misure magnetiche è prevista una gap sul piano di separazione dei semitoroidi di circa 5 millimetri ottenuta allontanando i carrelli tra loro e interponendo tra i semitoroidi opportuni distanziatori amagnetici.

L'intero apparato viene assiemato nella sala sperimentale, al lato dell'asse dell'acceleratore, e traslato nella posizione definitiva a montaggio ultimato [Fig. 4].

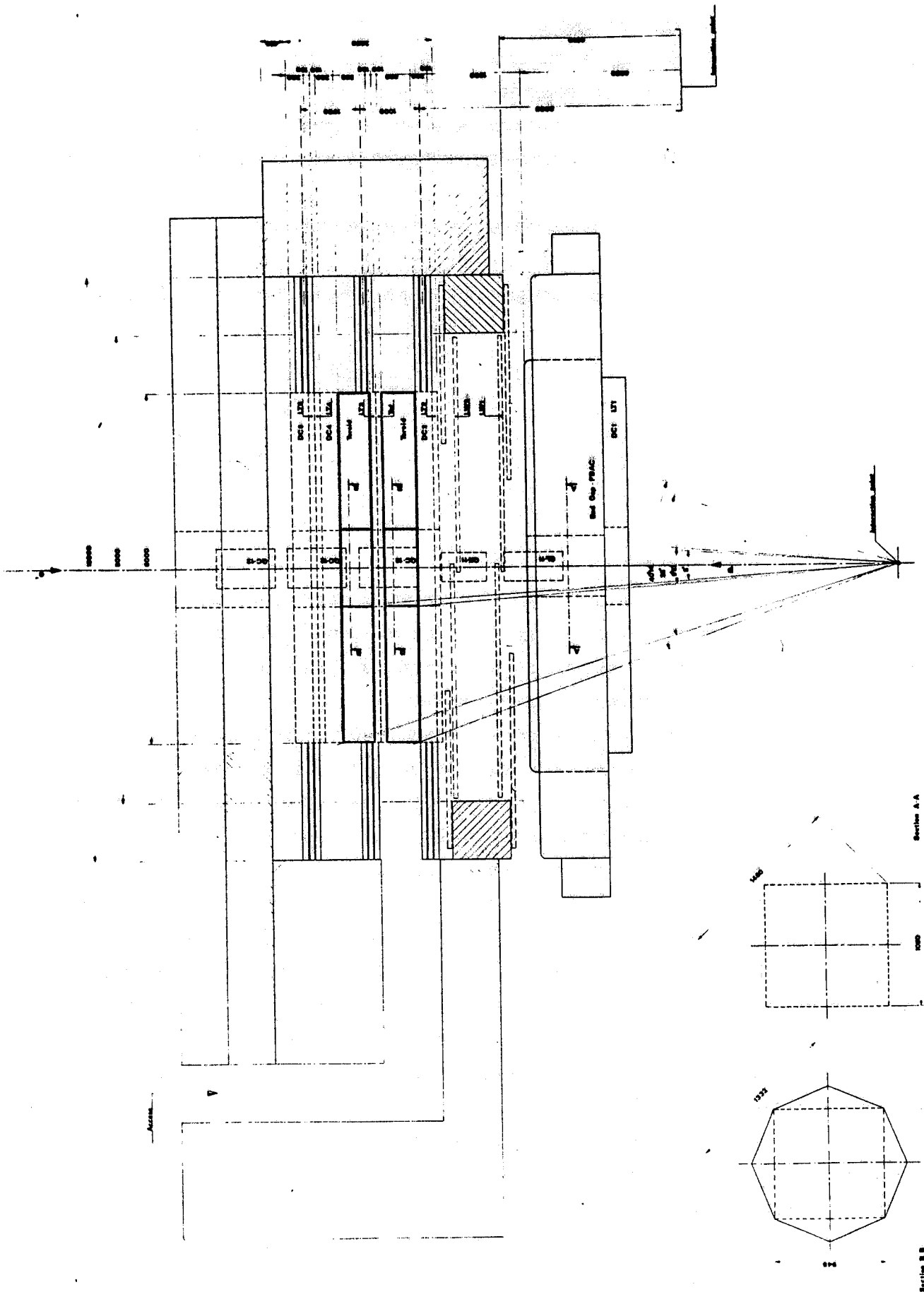


FIG. 1- Top view.

Section A-A
See Note below table 110

Section B-B
See Note below table 110

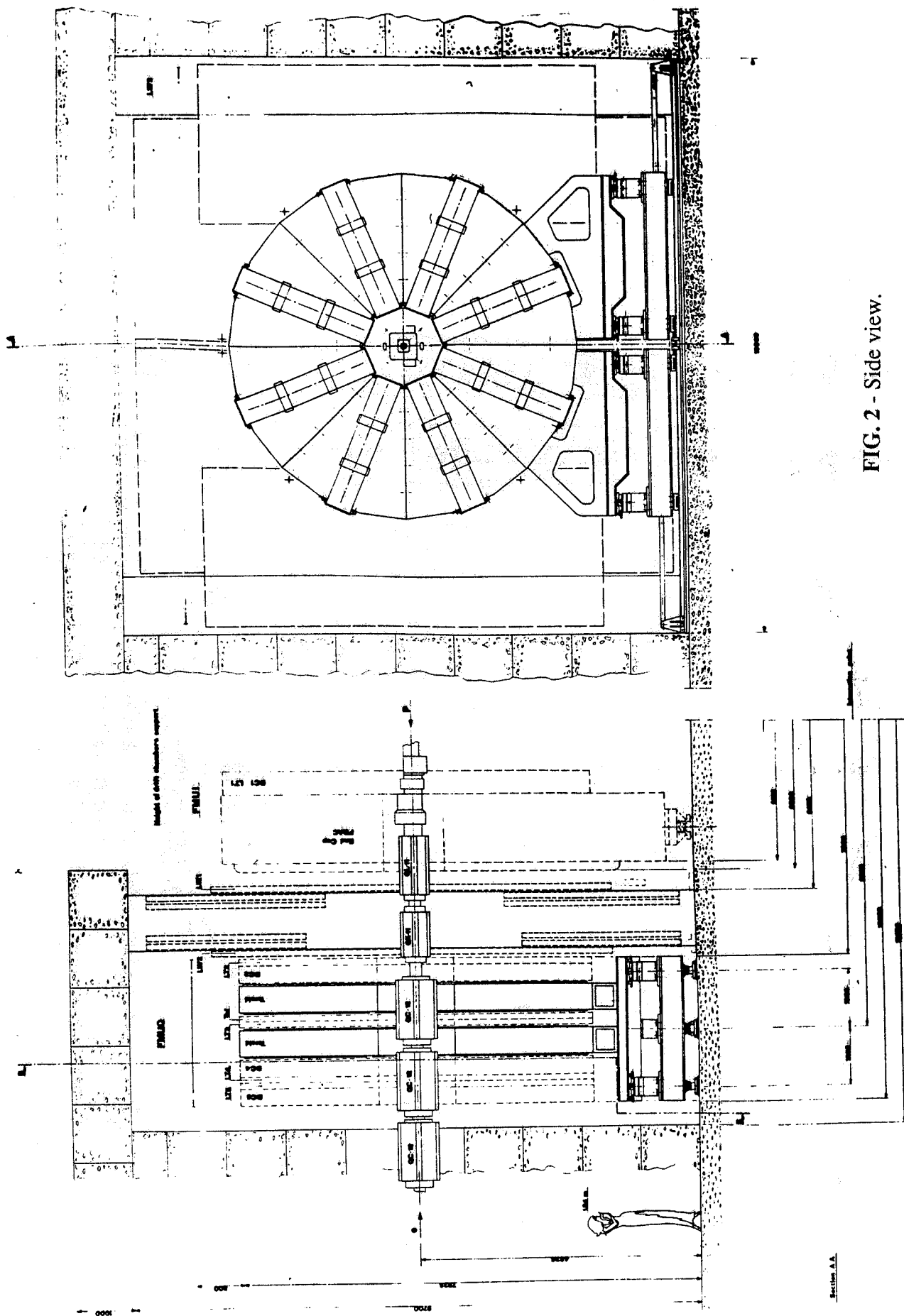


FIG. 2 - Side view.

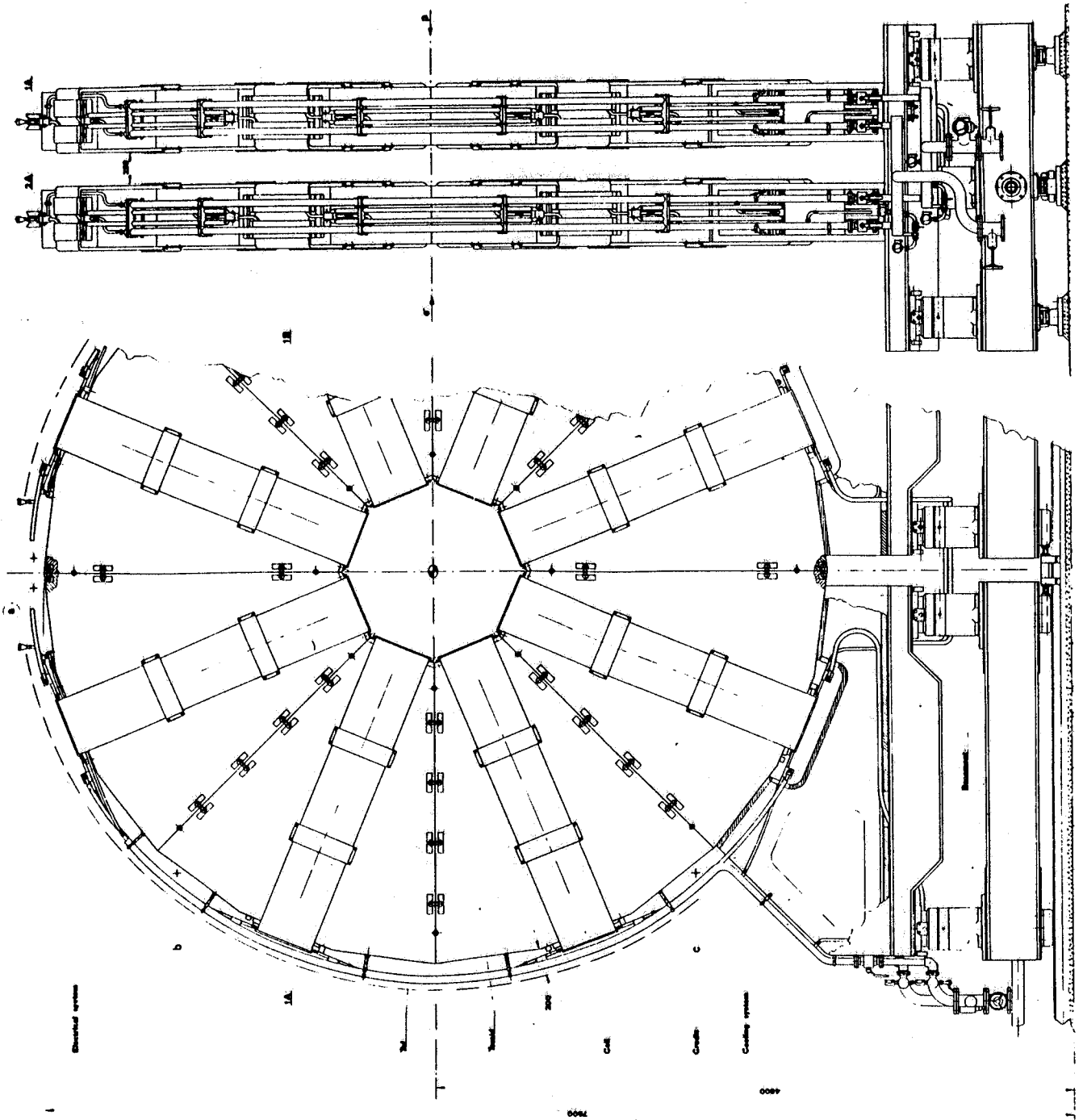


FIG. 3 - Toroids assembly.

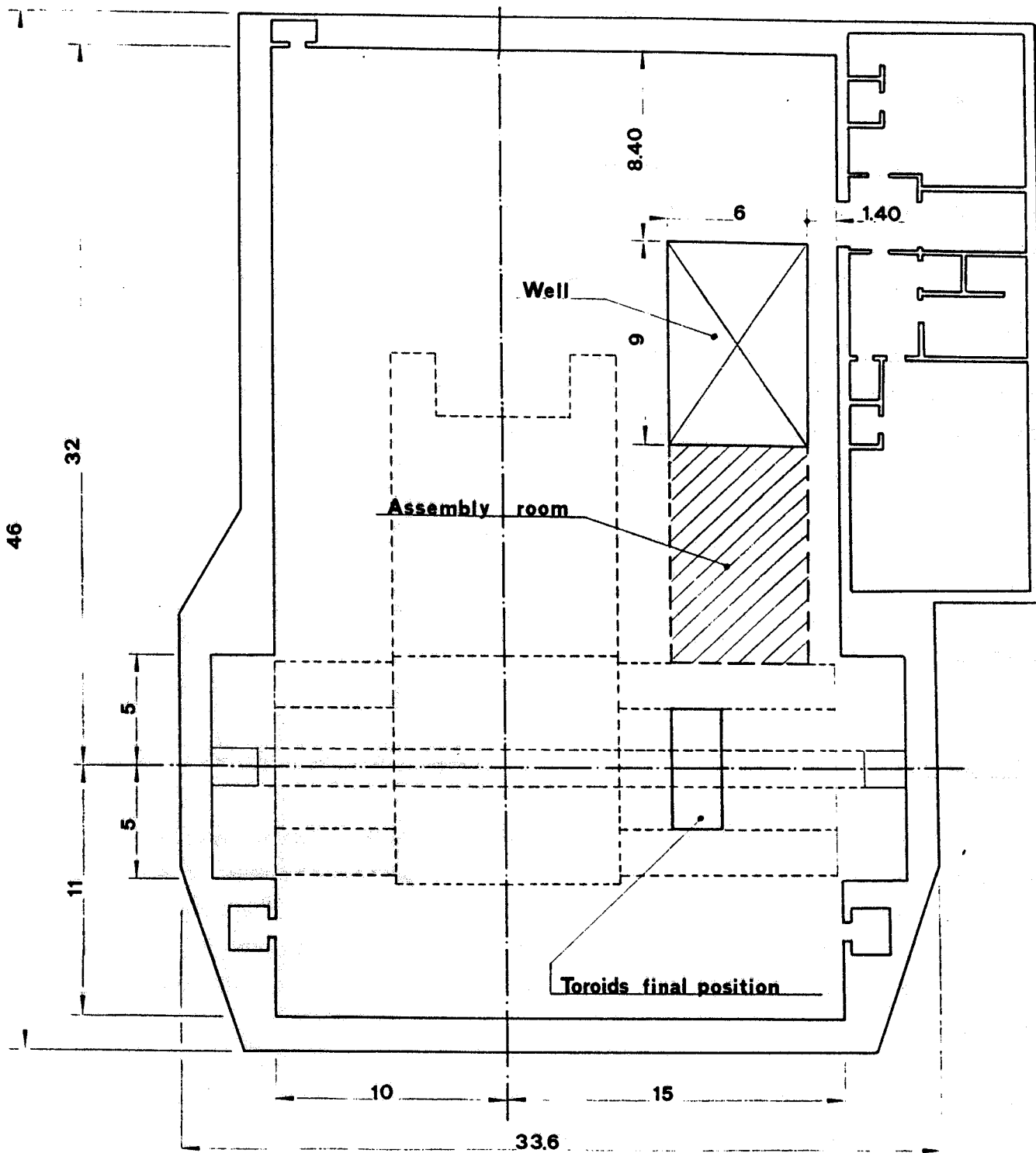


FIG. 4 - Experimental hall plan.

3.- DESCRIZIONE DELLE VARIE PARTI

3.1.- Toroidi

I toroidi sono costituiti da 16 settori uguali, 8 per toroide, ogni settore pesa circa 12,5 tonnellate e sono uniti insieme con opportuna bullonatura e spinatura. Il peso di un toroide finito è circa 100 tonnellate.

Il ferro utilizzato è a basso contenuto di carbonio, tipo Fe GM 01 UNI 3595 (2) o simili [Fig. 5].

Per evitare interferenze magnetiche ai quadrupoli della macchina, che attraversano il foro centrale dei toroidi [Fig. 6], il valore del campo disperso a 350 mm di raggio dall'asse dei toroidi è contenuto entro i 100 gauss. Il problema magnetico è stato studiato utilizzando il codice di calcolo "Poisson"⁽³⁾. La Fig. 7 mostra l'andamento dell'induzione (B) in funzione della distanza (R) dall'asse del fascio.

La forza coercitiva non supera i 100 A/m dopo la magnetizzazione a 20000 A/m corrispondente ad una forza attrattiva di 5 daN tra le facce contrapposte.

Tutte le superfici sono sgrossate ad eccezione di quelle di accoppiamento dei settori che hanno una rugosità compresa tra 0,8 e 1,6 Ra.

3.2.- Bobine

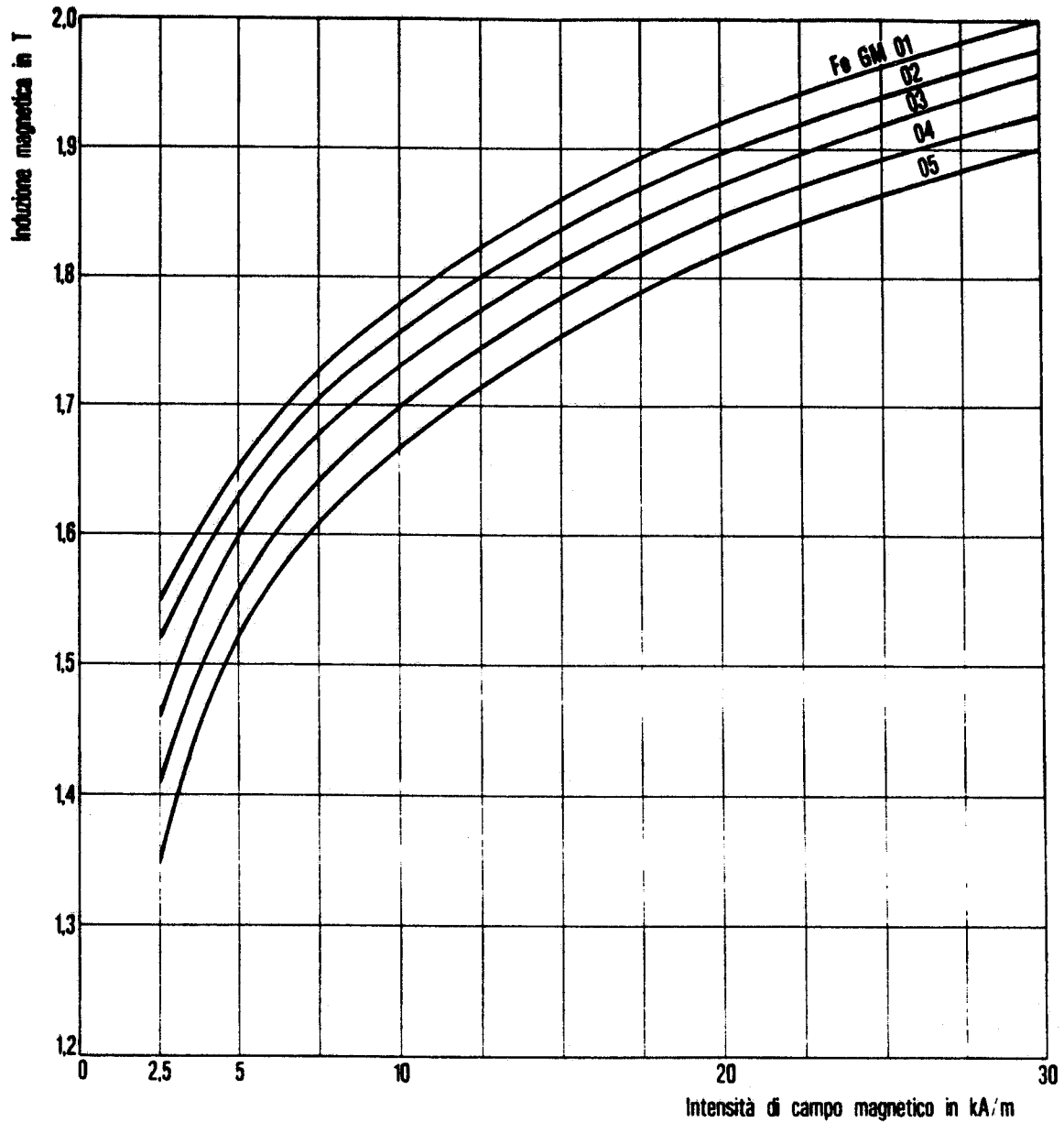
La magnetizzazione dei toroidi è ottenuta con 16 bobine, 8 per toroide, distribuite lungo la loro circonferenza e collegate elettricamente in serie [Fig. 8]. Ogni bobina è composta di 22 spire e pesa circa 318 daN. Il peso totale delle sedici bobine è di circa 5100 daN (5,1 tonnellate).

Per lasciare il massimo spazio ai rivelatori, in modo particolare tra i due toroidi, le bobine sono costruite con il conduttore disposto su di un unico strato e accostate al massimo alla superficie dei toroidi.

Il conduttore è di rame ad alta conducibilità ed esente da ossigeno tipo Cu-OF UNI 5649-71 o simili. La forma del conduttore è quadrata con 19 mm di lato e foro circolare interno di 10 mm di diametro per il passaggio dell'acqua di raffreddamento.

L'isolamento tra le spire è realizzato con nastro in micavetro o simili, spessore minimo 0,1mm, avvolto sul conduttore con sovrapposizione di metà larghezza, il tutto fasciato insieme con nastro di cotone impregnato in aria con vernice isolante ed essiccato tramite cottura.

Ogni bobina è dotata di quattro termoresistenze per il controllo della temperatura posizionate nei punti più critici. Nei tratti di uscita del circuito idraulico è saldato un interruttore termico con taratura a 60C° che comanda l'apertura del circuito di alimentazione elettrica in caso di surriscaldamenti.



Qualità di acciaio*	Intensità di campo magnetico in kA/m				Prova di trazione						Resilienza		Composizione chimica (analisi di colata)	
	2,5	5,0	10,0	30,0	Carico unitario di rottura		Carico unitario di snervamento		Allungamento	Strizione	KCU min.	KV min.	P max. %	S max. %
	Induzione magnetica min.				R min.		R _s min.		A min.	Z min.				
UNI 3595	T				N/mm ²	kgf/mm ²	N/mm ²	kgf/mm ²	%	%	J	J		
Fe GM 01	1,55	1,65	1,78	2,00	340	35	160	16,5	25	50	20	30	0,035	0,035
Fe GM 02	1,52	1,63	1,76	1,98	380	39	180	18,5	25	45	15	25	0,035	0,035
Fe GM 03	1,46	1,60	1,73	1,96	450	46	220	22,5	22	40	12	20	0,035	0,035
Fe GM 04	1,41	1,56	1,70	1,93	520	53	260	26,5	18	35	10	15	0,035	0,035
Fe GM 05	1,35	1,52	1,67	1,90	600	61	300	30,5	15	-	-	-	0,035	0,035

* La designazione è conforme alla UNI EU 27; il significato dei simboli è il seguente: **Fe G**, simbolo iniziale; **M**, applicazioni magnetiche; 01...05, grado decrescente dell'induzione magnetica.

FIG. 5 - Iron characteristics (norma UNI 3595).

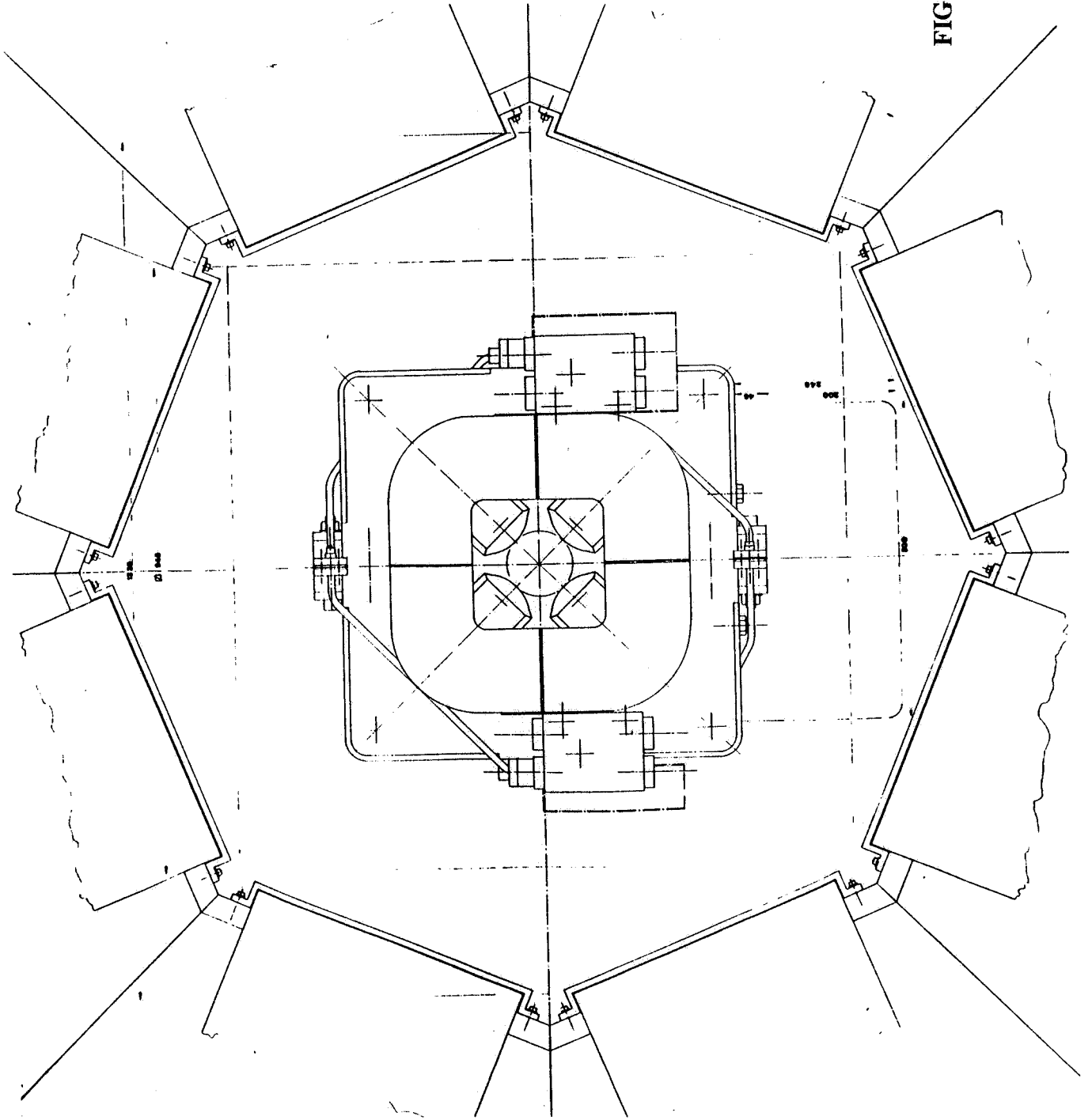


FIG. 6 - Quadrupole position.

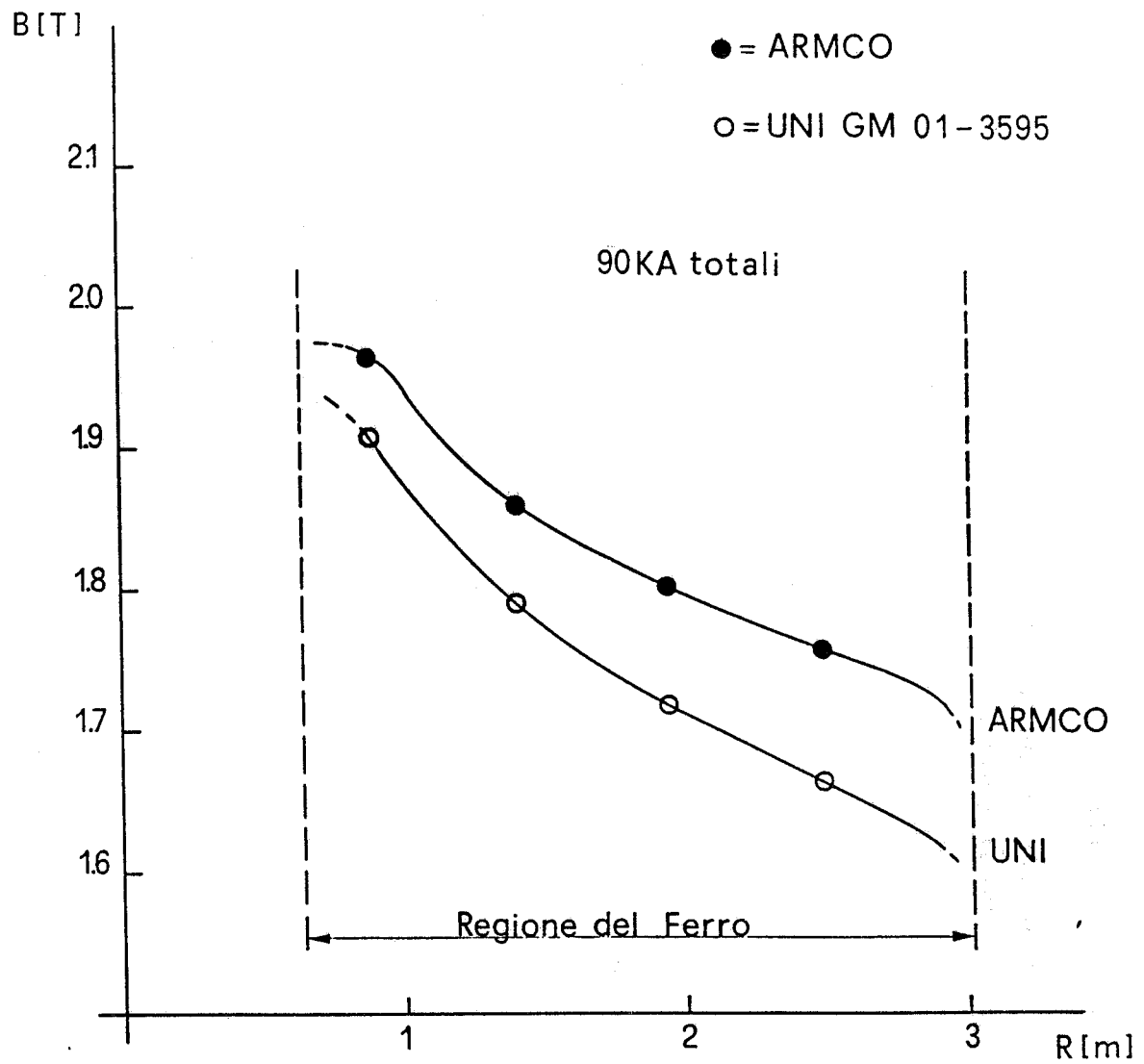


FIG. 7 - Andamento del B in funzione di R.

	I	V
with gaps	509 A	30+30=60V
without gaps	428 A	26+26=52V

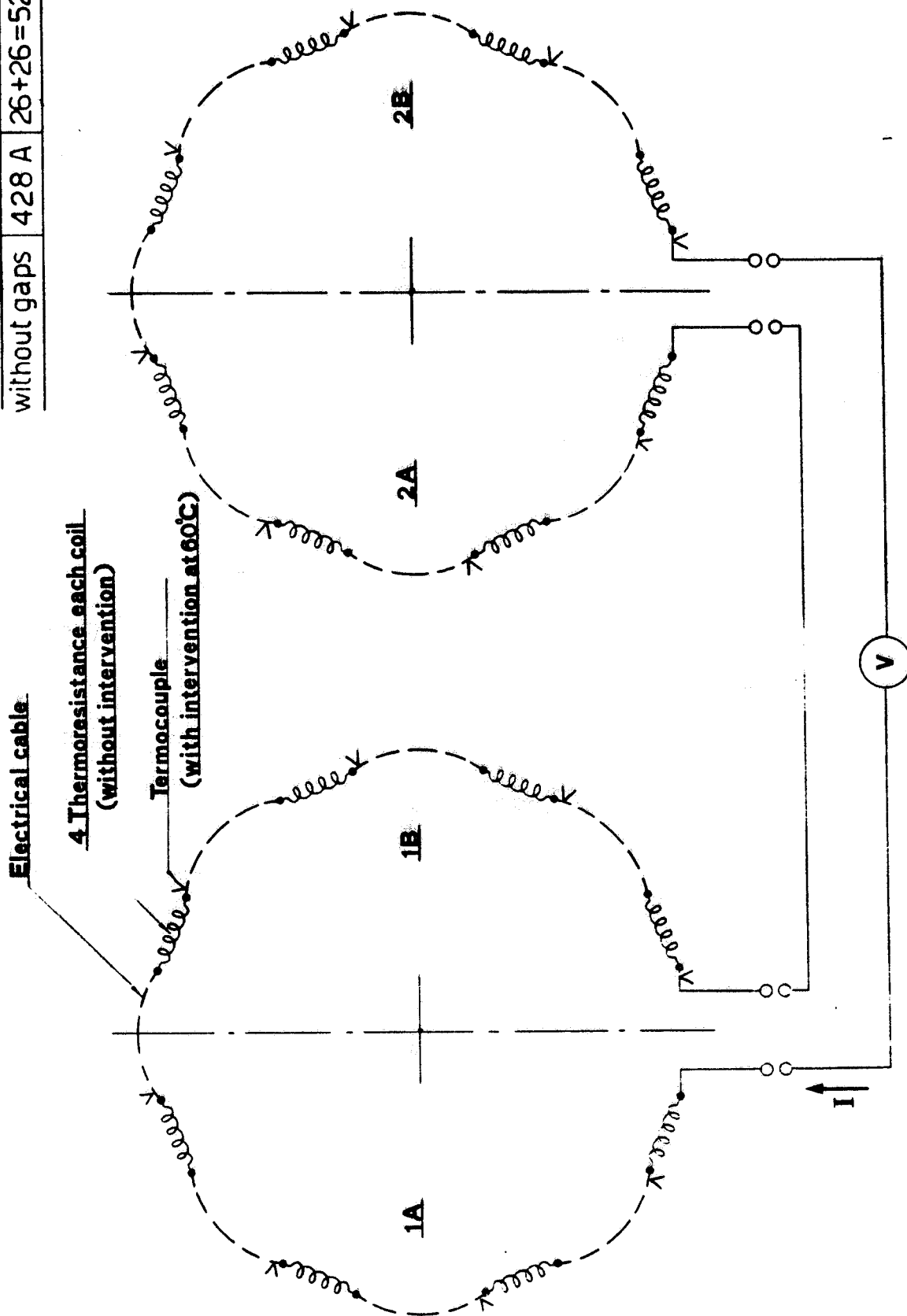


FIG. 8 - Electrical system.

3.2.1.- Caratteristiche elettriche

Per ottenere i 7800 e i 6600 A/m, necessari a produrre un'induzione magnetica media di 1,7 Tesla all'interno del ferro sia con gaps che senza, le otto bobine del toroide sono alimentate rispettivamente da una corrente di 509 e 430 A con una tensione di 31 e 26 V per toroide. La densità di corrente è di 1.8 e 1.5 A/mm² e la potenza dissipata è di 16 e 12 KW per toroide [Tab. I e II].

Allo scopo di ottenere la massima affidabilità funzionale, condizione necessaria per evitare interventi complessi durante il funzionamento dell'apparato, le bobine sono sottoposte alle seguenti prove elettriche.

a) Prova di isolamento verso massa

Effettuata con induttore a 1000V per misurare la resistenza di isolamento fra il conduttore in tensione e una massa realizzata avvolgendo la bobina con stagnola o alluminio. Nella prova sono collegati a massa anche i conduttori di uscita dei termoelementi.

I valori non dovranno essere inferiori a 20 MΩ.

b) Prova di isolamento tra le spire

Eseguita con il metodo a trasformatore in cui la bobina di prova funziona da secondario. C.d.t. di prova > 10V/spira.

c) Prova di rigidità dielettrica

Le bobine predisposte come alla voce a) sono sollecitate tra il rame e la massa con una tensione non inferiore a 2000V-50Hz, per il tempo di un minuto, senza rilevare scariche elettriche.

3.2.2.- Caratteristiche idrauliche

Per dissipare i 16 KW le otto bobine, collegate idraulicamente in parallelo [Fig. 9], sono flussate con 1360 litri/ora di acqua demineralizzata a 11°C. Il rialzo termico è di 10°C e la caduta di pressione è di 0,10 MPa (1,0 bar) [Tab. I e II].

Le bobine ed il circuito idraulico sono collaudati con una pressione statica di 2 MPa (20 bar) per un tempo di 5 minuti.

Il circuito idraulico è dotato della seguente strumentazione:

circuito di mandata

- valvola manuale d'intercettazione primaria;
- manometro a vista e remoto senza intervento. Fondo scala 0,5MPa (5 bar);
- termometro a vista e remoto senza intervento. Fondo scala 50°C;
- valvola manuale d'intercettazione secondaria;

circuito di ritorno

- valvola manuale d'intercettazione primaria;
- flussometro a vista e remoto con intervento a 500 l/h. Fondo scala 3000 l/h;

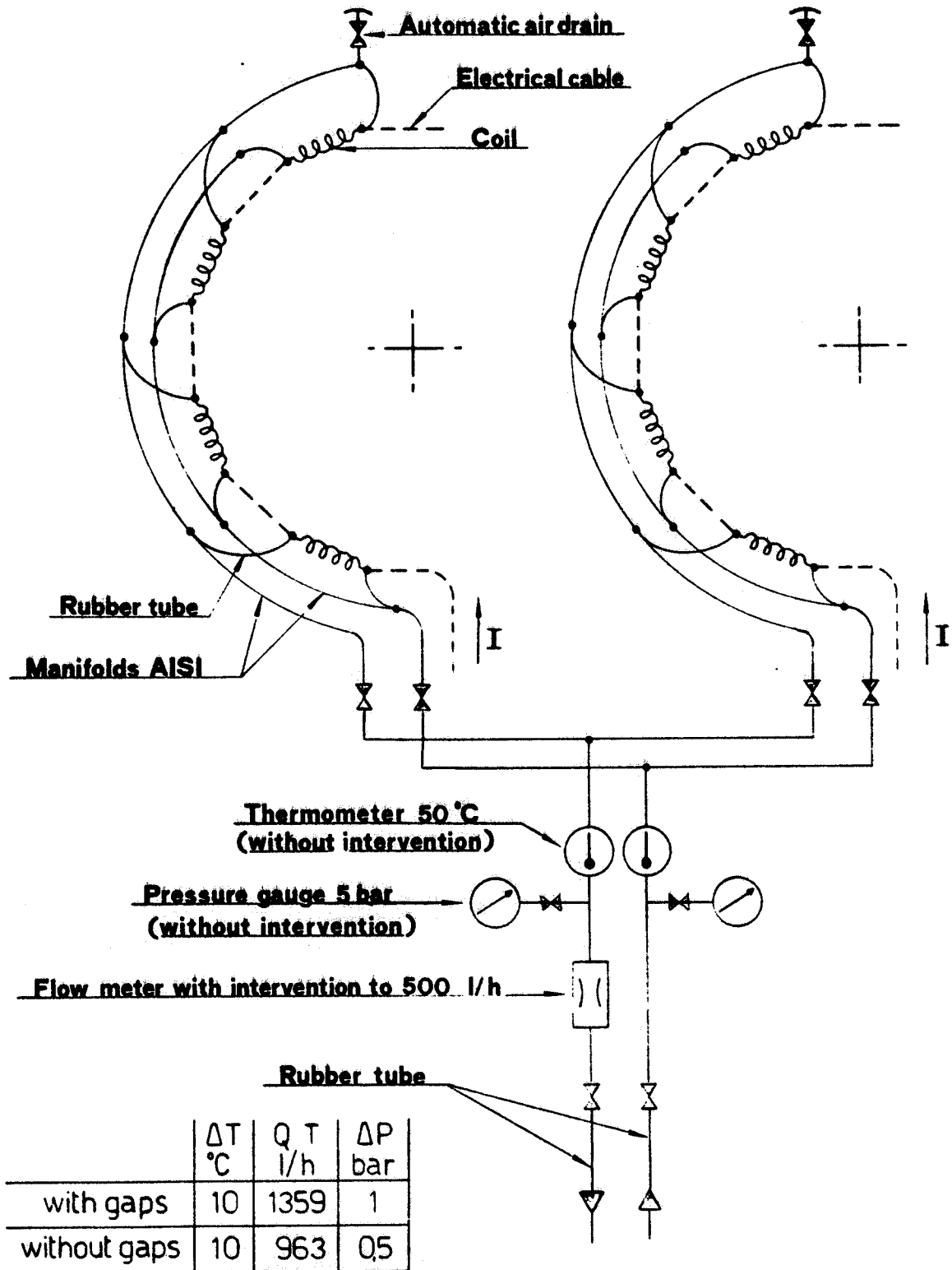
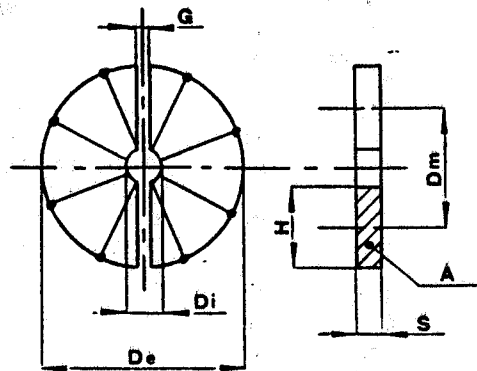


FIG. 9 - Cooling system.

Tabella I - Magnetic, electrical and hydraulic characteristics with gaps.

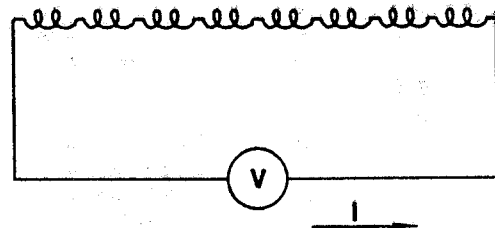
MAGNETIC CALCULATION (one toroid)

1.7	B		Tesla	average magnetic induction
.00026	μ		Henry/M	absol. para. (Fe GND1 UN13595)
216	μ_r		-	relat. para. (Fe GND1 UN13595)
.0000012	μ_0		Henry/M	air magnetic permeability
.01	G		M	gap = 5mm+5mm
11.5	L		M	toroid average length
	NIG	14166.667	Asp	gap magnetic intensity
	NI	89591.049	Asp	total magnetic intensity
	R1	46442.308	1/Henry	iron reluctance
	R2	8750	1/Henry	gap reluctance
	F	1.785	weber	flux
1.33	Di		M	internal diameter
6	De		M	external diameter
.45	S		M	iron thickness
2.33	H		M	iron height
1.05	A		M ²	iron cross section
95	IH		Tons	iron weight (one toroid)

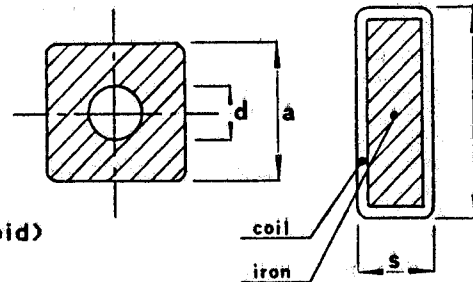


ELECTRICAL CALCULATION (one toroid)

176	N		-	total turns
.017	r		Q ^{mm} 2/M	copper resistivity
	le	1013.76	M	total conductor length
.019	a		M	conductor side
.01	d		M	water hole diameter
	Sr	283	mm ²	copper section
	W	15779.802	W	total power
	W1	15779.802	W	total power
	R	.06089724	Q	resistance
	I	509.04005	A	total current
	U	30.999136	Volts	voltage
	Cd	1.7987281	A/mm ²	current density



8	C		-	coils number (one toroid)
22	n		-	turns per coil
2.4	h		M	coil height
.48	s		M	coil width
	Ch	22554.675	daH	copper weight (one toroid)



COOLING CALCULATION (one toroid)

4.18	cp		KJ/C°	water specific heat
L 10	dt		C°	water input output teperature
	Q1	169.87825	lit/hour	flow/coil
L	Qt	1359.026	lit/hour	total flow (one toroid)

1	Sa	.000078	M ²	water cross section
	c		-	coils in series
	WU	.60497953	M/sec	water speed
102	f		daH*sec ²	water density (20C°)
.0001	q		daH*sec/M	water absolute viscosity
	NR	6170.7912	-	Reynolds number
	k	.03565348	-	water friction per NR>2000
9.8	ga		M/sec ²	gravity acceleration
	y	.06657745	M/M	loss of pressure in M/M
	cl	126.72	M	one coil length
L	Y	.84366944	Ate	total loss pressure
	Y1	.8276504	Ate	total loss pressure

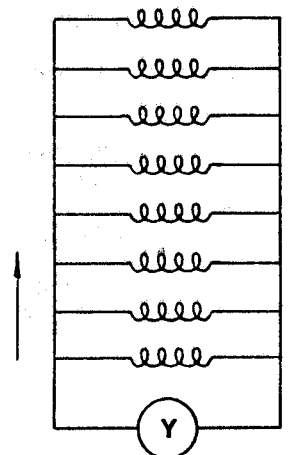
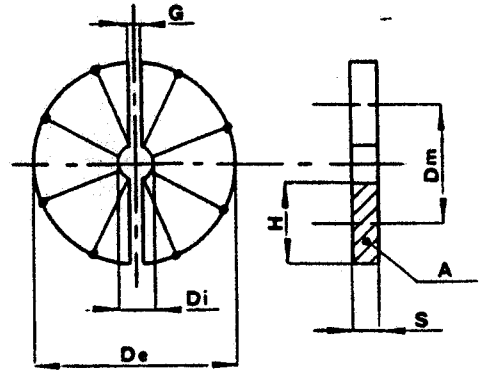


Tabella II - Magnetic, electrical and hydraulic characteristics without gaps.

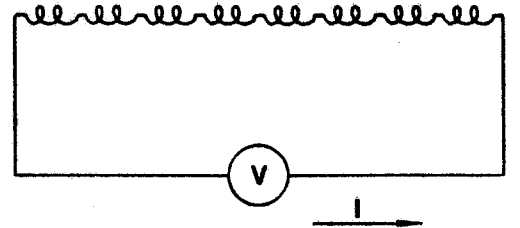
MAGNETIC CALCULATION (one toroid)

1.7	B		Tesla	average magnetic induction
.00026	μ		Henry/M	absol. para. (Fe GND1 UN13595)
216	μ_r		-	relat. para. (Fe GND1 UN13595)
.0000012	μ_0		Henry/M	air magnetic permeability
0	G		M	gap = $5\mu + 5\mu$
11.5	L		M	toroid average length
	NIG	0	Asp	gap magnetic intensity
	NI	75424.383	Asp	total magnetic intensity
	R1	46442.308	1/Henry	iron reluctance
	R2	0	1/Henry	gap reluctance
	F	1.785	weber	flux
1.33	Di		M	internal diameter
6	De		M	external diameter
.45	S		M	iron thickness
2.33	H		M	iron height
1.05	A		M ²	iron cross section
95	W		Tons	iron weight (one toroid)

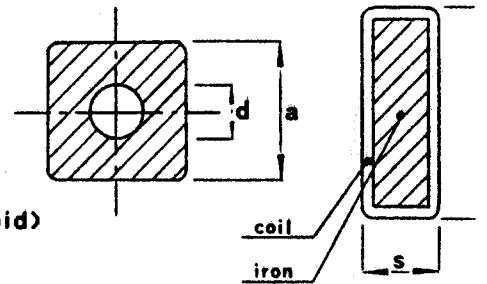


ELECTRICAL CALCULATION (one toroid)

176	N		-	total turns
.017	r		$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{M}$	copper resistivity
	le	1013.76	M	total conductor length
.019	a		M	conductor side
.01	d		M	water hole diameter
	Sr	283	mm^2	copper section
	W	11183.966	W	total power
	W1	11183.966	W	total power
	R	.06089724	Ω	resistance
	I	428.54763	A	total current
	U	26.097369	Volts	voltage
	Cd	1.5143026	A/mm^2	current density



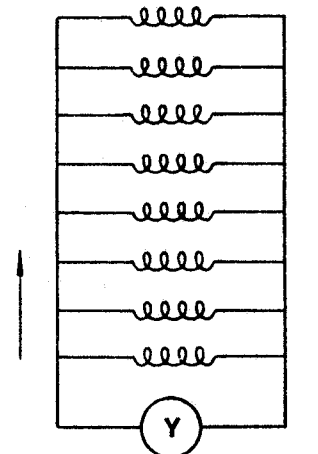
8	C		-	coils number (one toroid)
22	n		-	turns per coil
2.4	h		M	coil height
.48	s		M	coil width
	CW	72534.675	daN	copper weight (one toroid)



COOLING CALCULATION (one toroid)

4.18	cp		KJ/C°	water specific heat
L 10	dt		C°	water input output temperature
	Q1	120.40155	lit/hour	flow/coil
L	Qt	963.21237	lit/hour	total flow (one toroid)

	Sc	.000078	M^2	water cross section
1	c		-	coils in series
	WU	.42878043	M/sec	water speed
102	f		$\text{daN}^2/\text{sec}^2$	water density (20C°)
.0001	q		$\text{daN}^2/\text{sec}/\text{M}$	water absolute viscosity
	NR	4373.5604	-	Reynolds number
	k	.03685781	-	water friction per $\text{NR} > 2000$
9.8	ga		M/sec^2	gravity acceleration
	y	.03644955	M/M	loss of pressure in M/M
L	cl	126.72	M	one coil length
	Y	.46188867	Ate	total loss pressure
	Y1	.45311863	Ate	total loss pressure



- manometro a vista e remoto senza intervento. Fondo scala 0,5MPa (5 bar);
- termometro a vista e remoto senza intervento. Fondo scala 50°C;
- valvola d'intercettazione secondaria.

3.3.- Supporteria

La supporteria è composta: [Fig. 10]

a) da quattro culle sagomate con il compito di sostenere e collegare rigidamente, mediante bullonatura e spinatura, i quattro semitoroidi ai telai sottostanti.

b) da due telai sui quali sono fissate sia le quattro culle che il sistema di scorrimento dei vari rivelatori.

c) da un sistema di regolazione, in X-Y-Z, dei telai che consente di ottenere un corretto accoppiamento dei semitoroidi.

d) da due piattaforme mobili, scorrevoli su rotaie mediante pattini a rulli, equipaggiate con un sistema motore a cilindri idraulici in grado di spostare i circa 120000 daN per carrello, corrispondenti a una spinta di 8400 daN a 6,5 MPa (65 bar) di pressione, con elongazione massima di 2000mm.

Ai telai e ai toroidi è affidato il compito di sostenere le strutture di supporto e scorrimento dei piani di rivelatori e di oggetti vari.

4.- SALA SPERIMENTALE

La sala sperimentale sud dell'anello di accumulazione HERA [Fig. 11] é situata a circa 4 km dal centro di Amburgo. Il livello della sala é a circa 25 metri sotto il piano stradale. Un pozzo di 9x6 metri quadrati assicura il collegamento con la superficie. [Fig. 4]

Il pozzo e la sala sono serviti da carroponete con portata di 20+20 tonnellate.

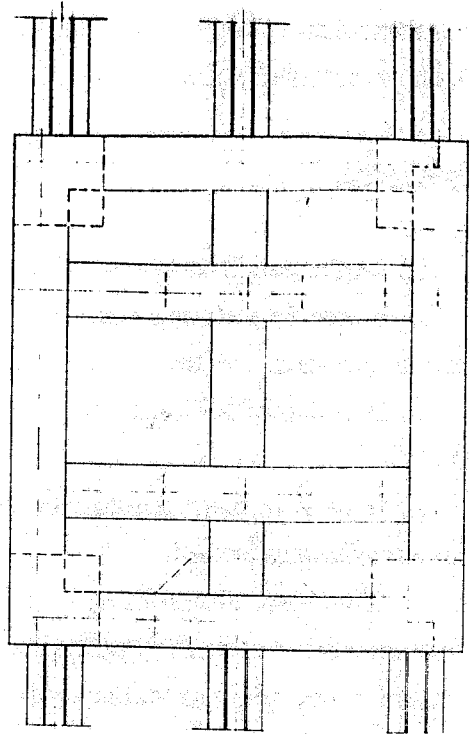
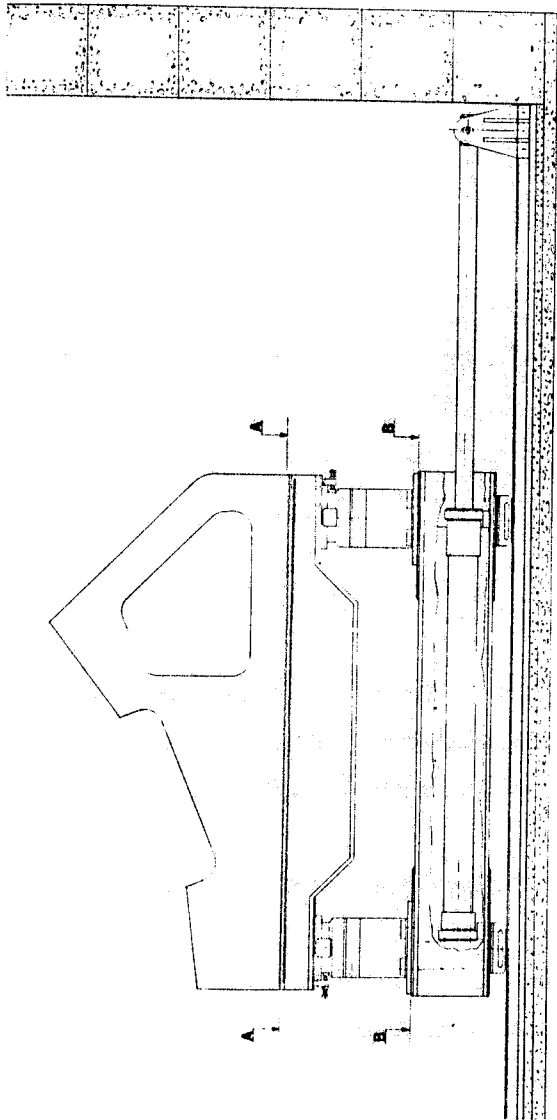
5.- COSTI E TEMPI

Il costo di 2.057 GL [Tab. III] è comprensivo di tutte le operazioni atte ad ottenere i toroidi costruiti e funzionanti quali, studi e prove, acquisto materiali, costruzioni, collaudi, acquisto attrezzature e componentistica, trasporto, installazione in sala sperimentale e fornitura del sistema di alimentazione elettrica ed idraulica.

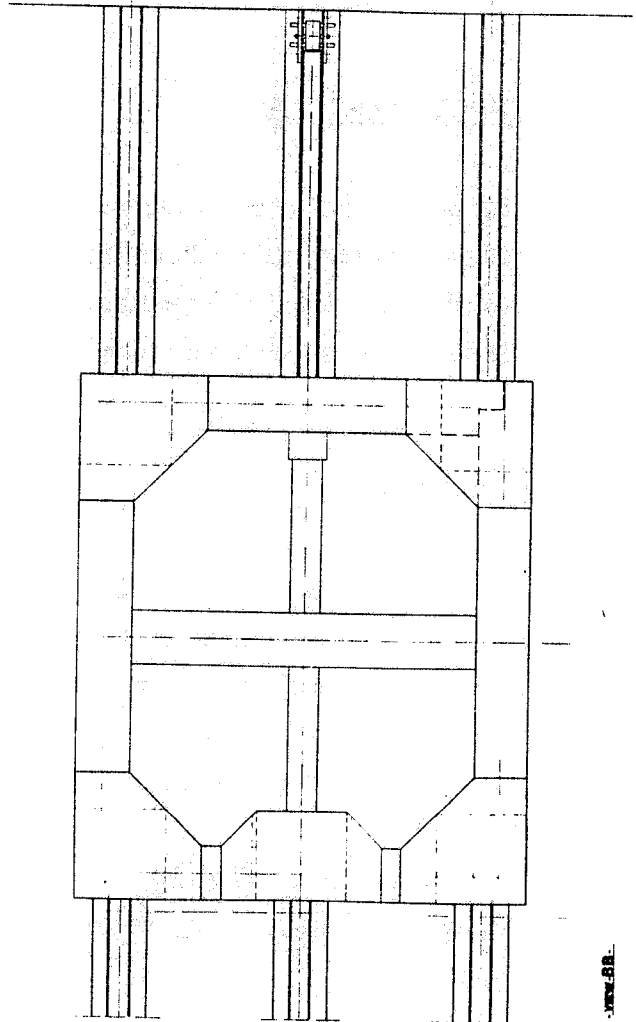
Il costo del ferro è riferito a quello di un materiale di buona qualità per usi magnetici, tipo Fe GM 01 UNI 3595.

I tempi calcolati [Tab. IV] sono puramente tecnici, non tengono conto di eventuali difficoltà di approvvigionamento, ritardi di costruzione, modifiche in corso d'opera e tempi amministrativi.

FIG. 10 - Supports and movements.



VIEW AA



VIEW BB

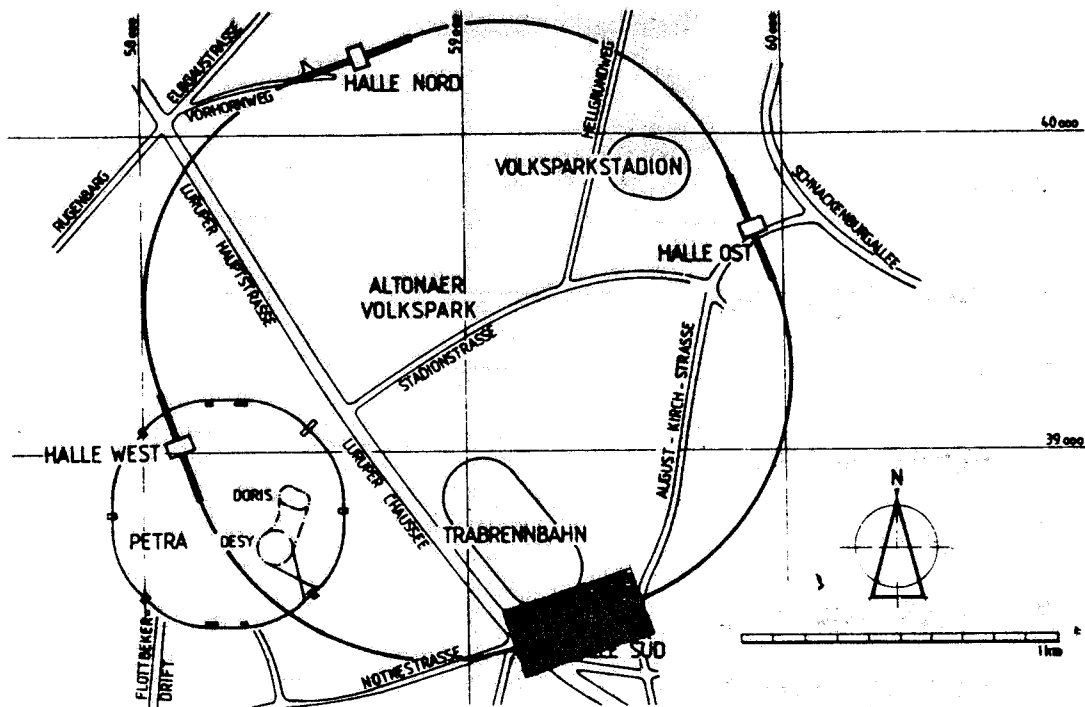
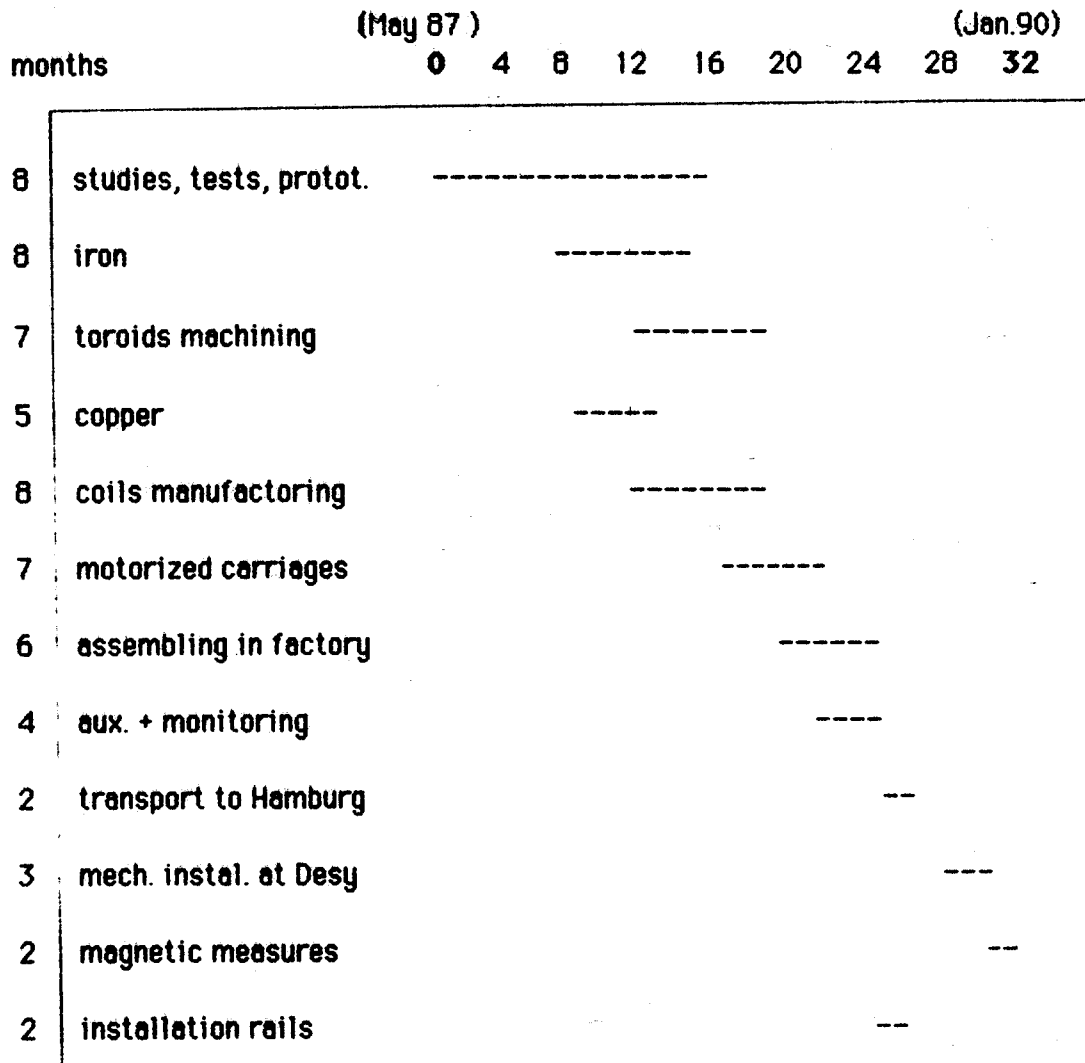


FIG. 11 - Accelerators layout.

Tabella III- Estimate costs.

studies and drawing	35	
tests	24	
prototypes and models	59	
Sub total		118
iron sheets (250 Tons-1.9 KL/daN)	472	
toroids machining (2.4 KL/daN)	590	
sub total		1062
copper (7.5 Tons-12.5 KL/daN)	94	
coils manufacturing (17.3 KL/daN)	130	
sub total		224
carriages- supports - rails	125	
assembling and cabling (in factory)	45	
aux.+monitoring	42	
equipments for installation	35	
sundries and tools	24	
sub totale		271
transport (250 Tons - 0.57 KL/daN)	142	
(from Milan to Hamburg)		
installation manpower at Desy		50
TOTAL		1867
electric power		150
water cooling		40
GRAND TOTAL		2057

Tabella IV- Schedule.



Nell'ipotesi elaborata i toroidi saranno installati e funzionanti per gennaio 1990 in accordo con i tempi programmati per l'intero apparato di ZEUS.

Ringraziamenti

Si ringrazia, S. Cerioni per l'impegno prestato nello sviluppo dei disegni costruttivi e A. Beatrici per l'elaborazione delle "artistic view" eseguite con l'uso del CAD.

REFERENZE

- (1) The ZEUS Detector, Status Report PRC 87-02, DESY 1987; Development of the ZEUS Detector, Desy 87-165, RAL 87-113, 1987.
- (2) Acciai non legati di qualità per getti con proprietà magnetiche UNI 3595
- (3) Calcoli del campo magnetico per toroidi FMUON, Ilkka Laakso, Z2 group Note Nov. 1987.